مجموعة الكتب الهندسية

نظريات وتصميم الآلات الكهربية

الآلات المتزامنة والمحولات الكهربية

دكتور مهندس

محمد أحمد قمر

أستاذ الآلات الكهربية بكلية الهندسة

جامعة الإسكندرية

الناشر منشأة المعارف بالإسكندرية

مجموعة الكتب الهندسية

نظريات وتصميم الآلات الكهربية

الآلات المتزامنة والمحولات الكهربية

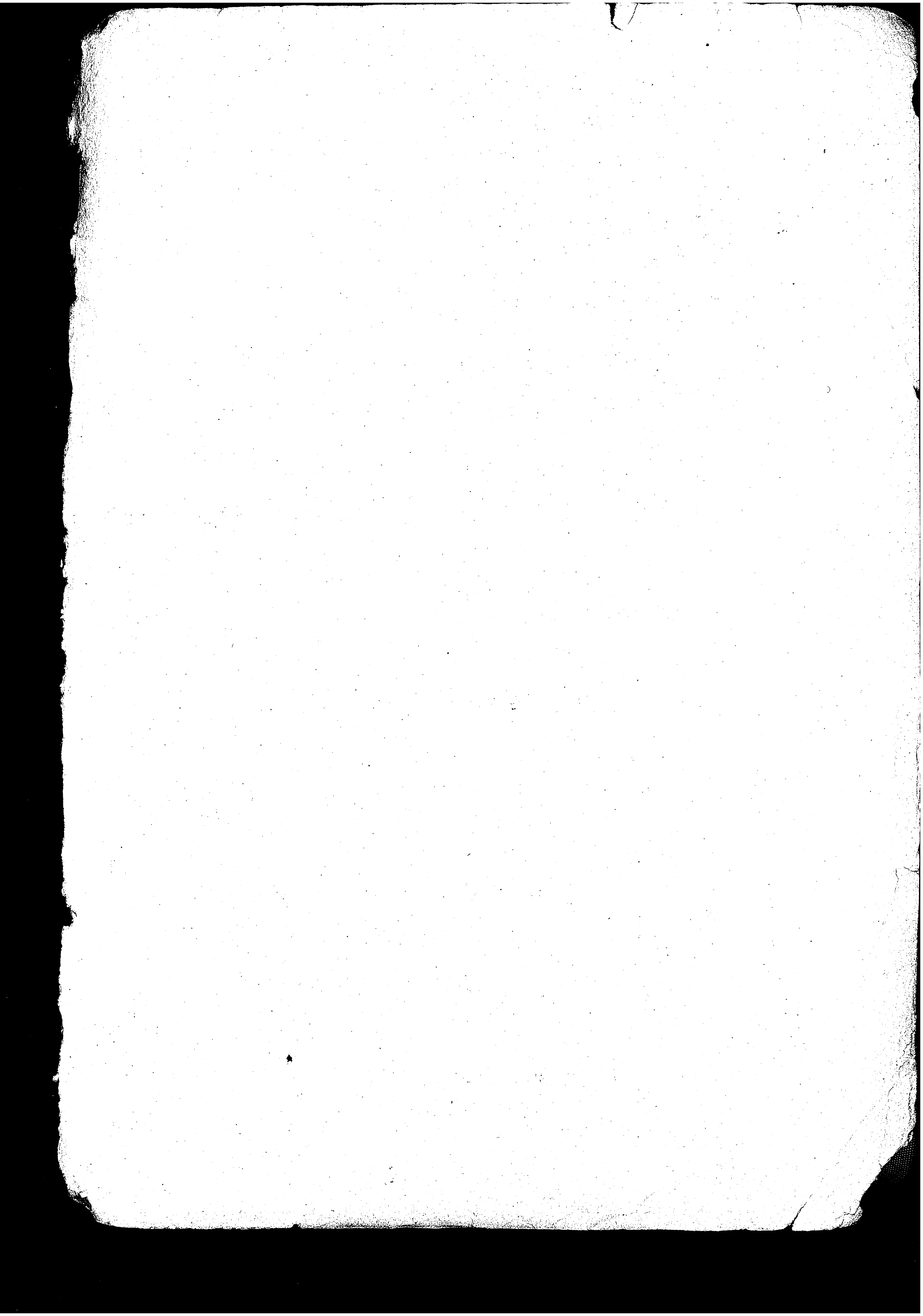
دكتور مهندس

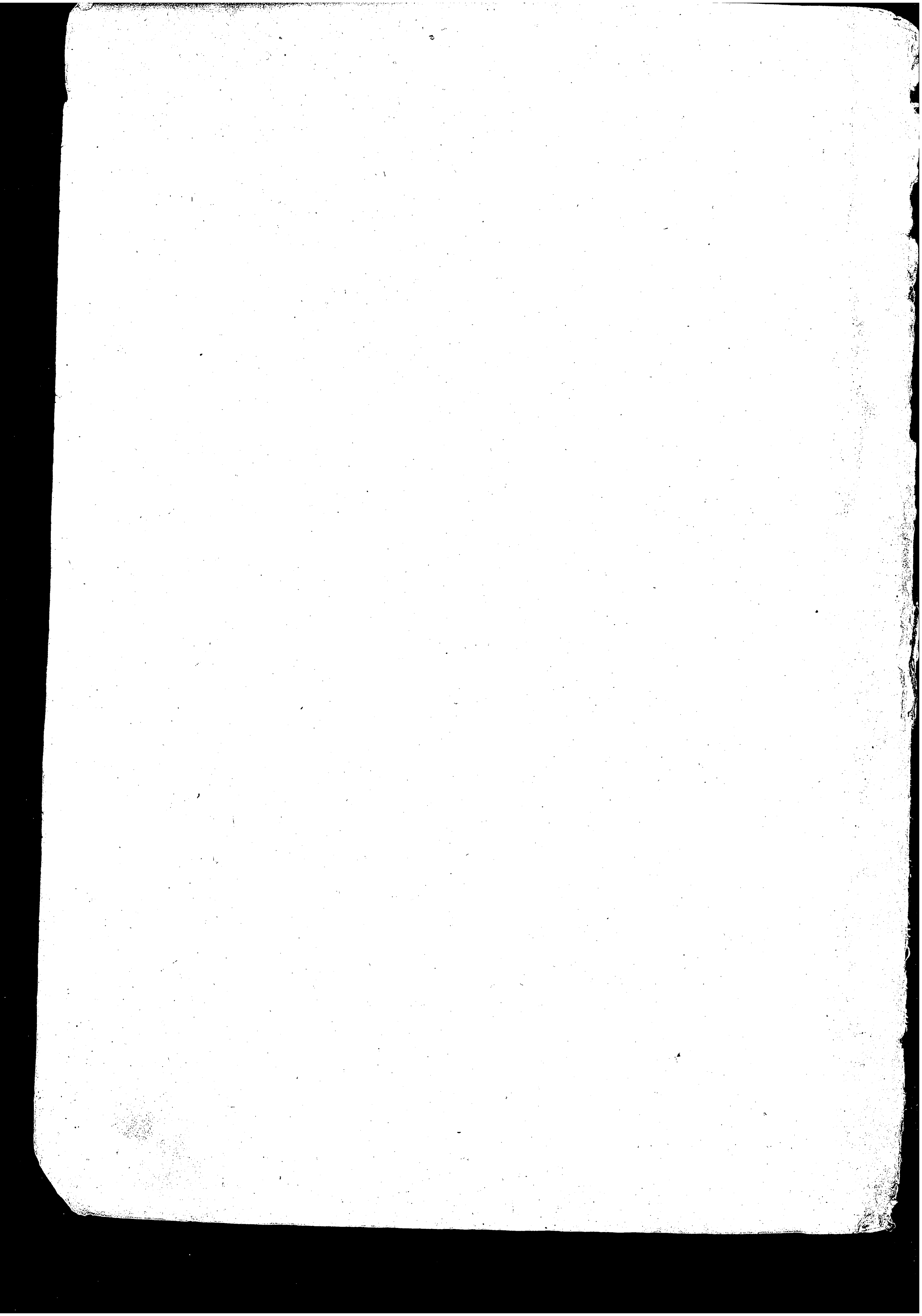
محمد أحمد قمر

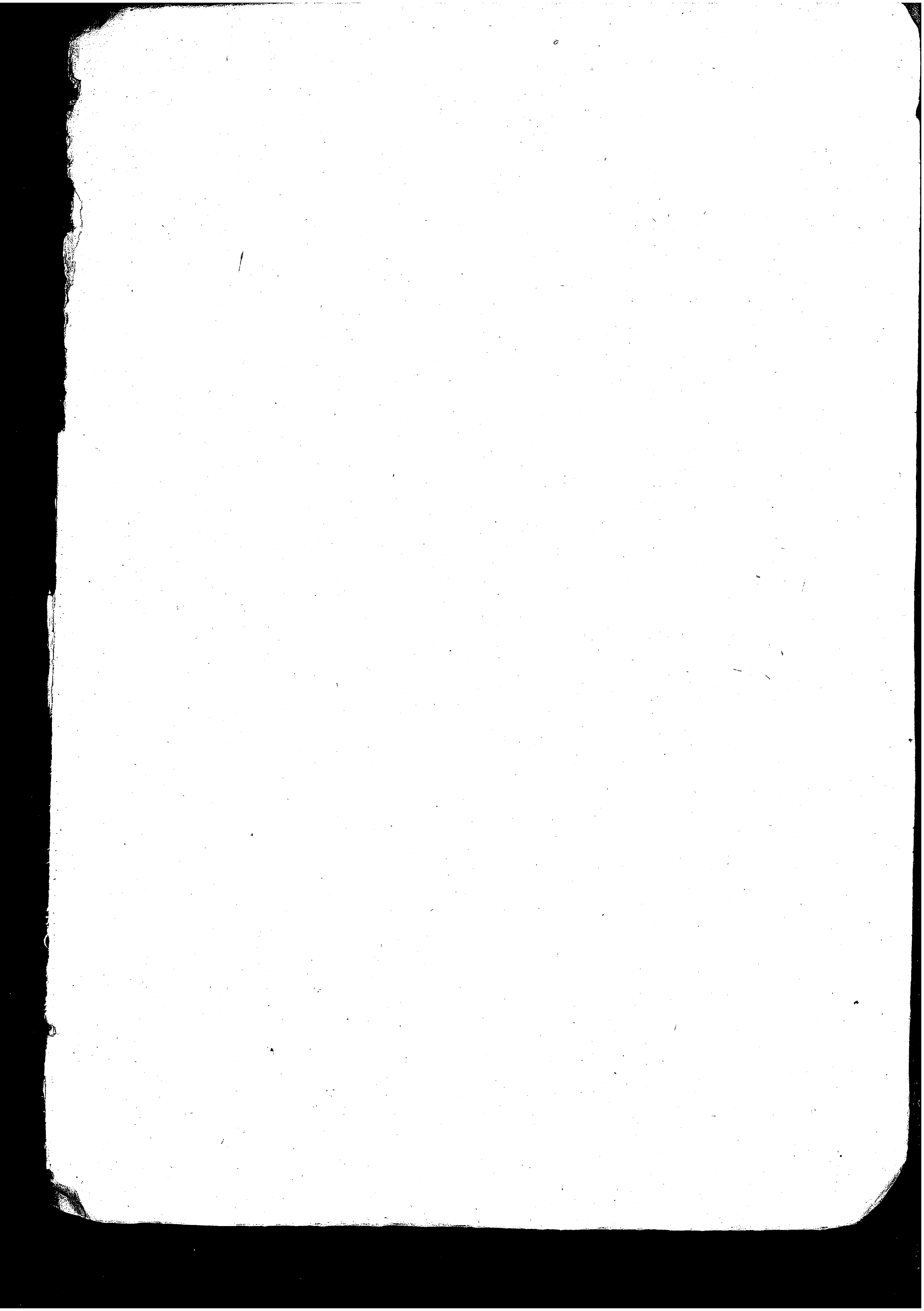
أستاذ الآلات الكهربية بكلية الهندسة

جامعة الإسكندرية

الناشر منشأة المعارف بالإسكندرية







نظريات وتصميم الآلات الكهربية

الآلات المتزامنة والمحولات الكهربية

تأليف

دكتور مهندس

محمد أحمد قمر

أستاذ الآلات الكهربية بكلية الهندسة

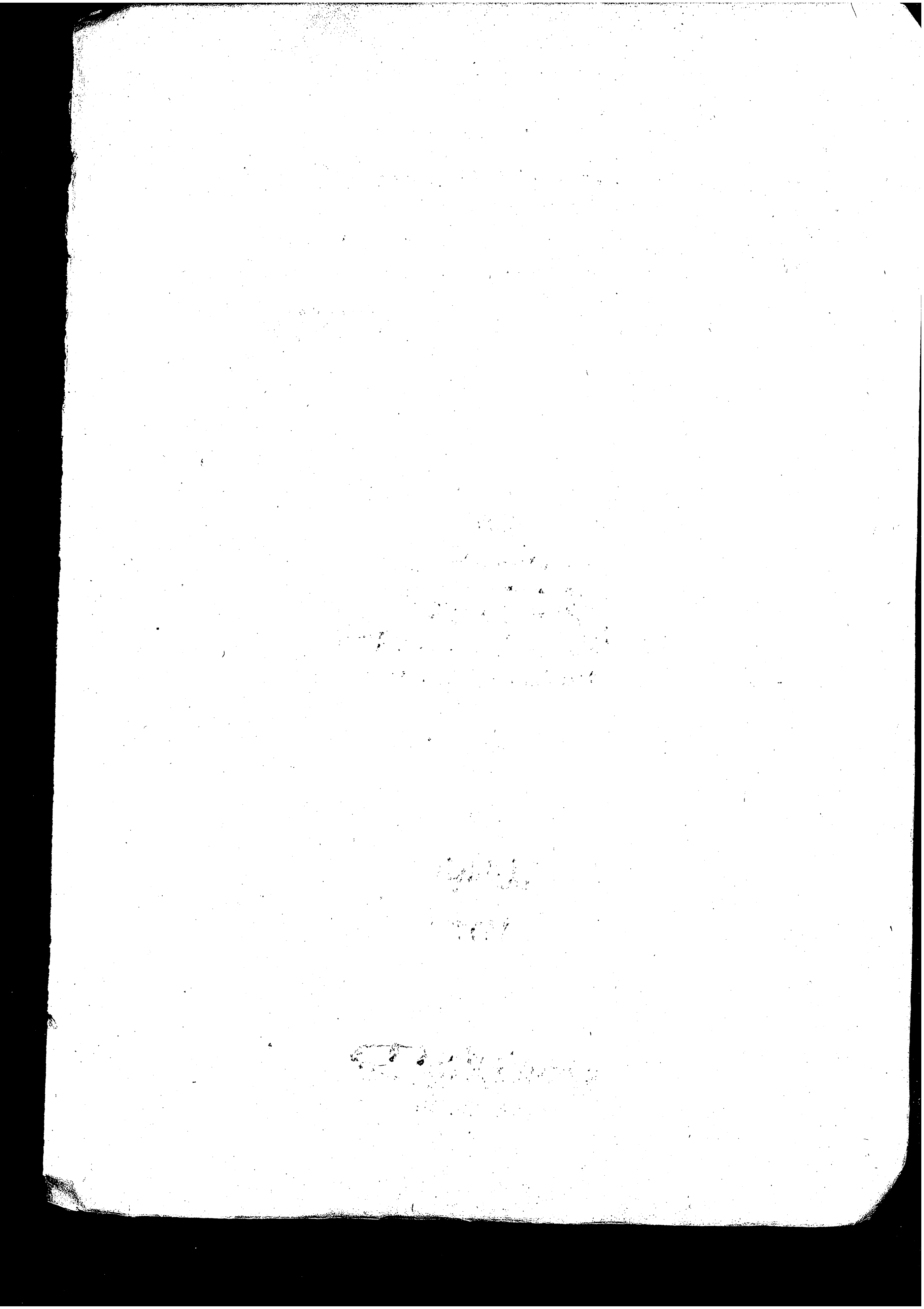
جامعة الإسكندرية

طبعة أولى

١٩٧٣

الناشر منشأة المعارف بالاسكندرية

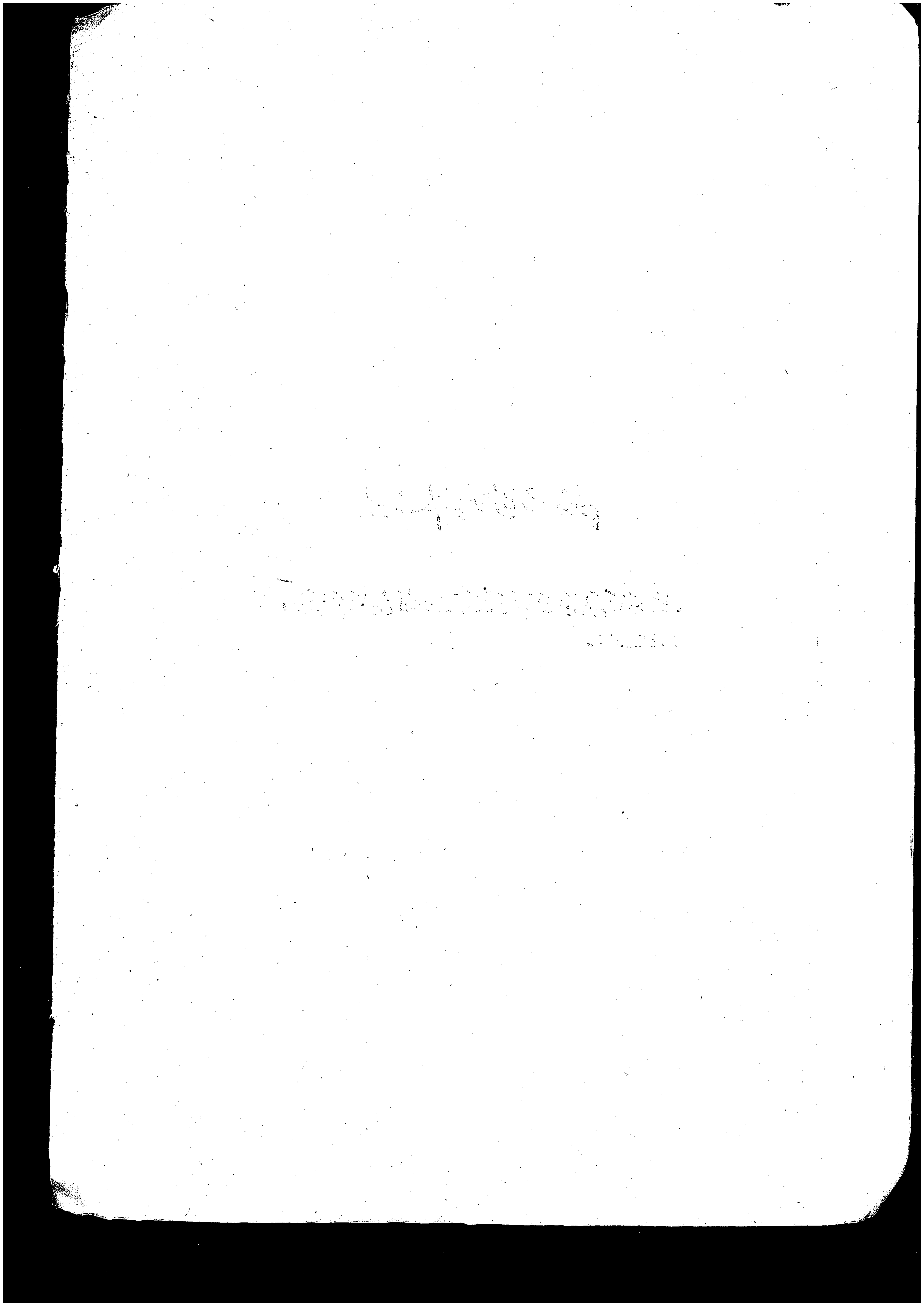
جلال حزي وشركاه



بسم الله الرحمن الرحيم

« رَبَّنَا آتِنَا مِنْ لَدُنْكَ رَحْمَةً وَهَيِّئْ لَنَا مِنْ أَمْرِنَا رَشَدًا »

ـ قرآن كريم ـ



مقدمة

هذا هو الكتاب الثانى ، فى مجموعة الكتب ، التى آليت على نفسى أن أقوم بتأليفها ، فى علم هندسة الآلات الكهربية ، باللغة العربية ، لكى تكون دليلا للدارسين العرب ، فى الجامعات والمعاهد ، وغيرها من دور العلم ، فى وطنى العربى الكبير ، يأخذ بيدهم ، ويساعدهم على تفهم هذا العلم ، الذى يعتبر ، بحق ، من أصعب العلوم التكنولوجية ، فى مجال الهندسة الكهربية .

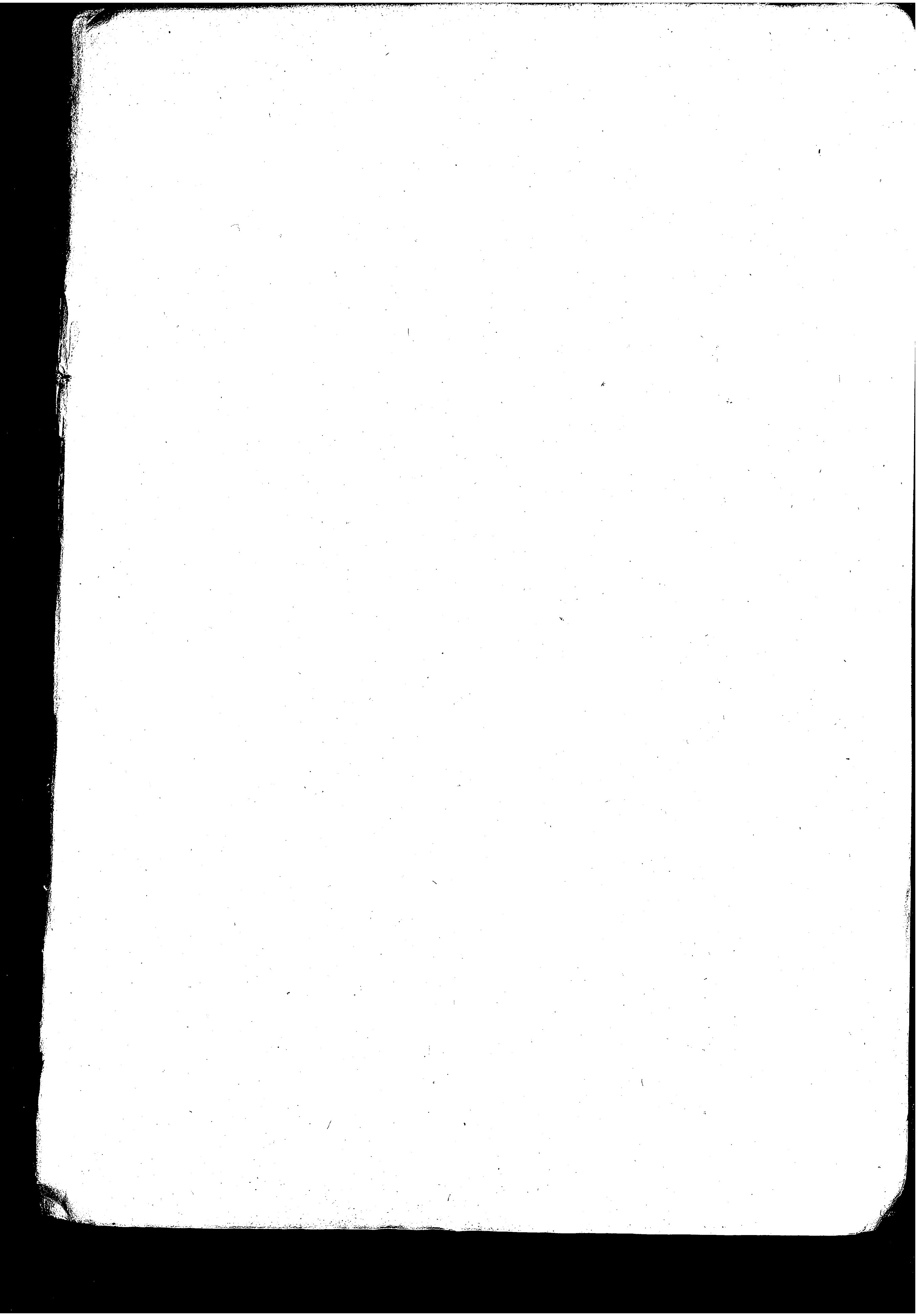
وانه ليثلج صدرى ، ويساعدنى على المضى فى سبيلى ، ماتفضل به على ، اخوانى من الأساتذة المختصين ، بالثناء والتشجيع ، وما لمسته بنفسى، وعبر عنه الكثيرون من أبنائى الطلبة ، من تيسير الأمر عليهم ، فى دراسة علم هندسة الآلات الكهربية ، نتيجة لهذا النهج فى الشرح والتفسير .

ولقد سرت ، فى هذا الكتاب ، على نفس النمط ، مثل الكتاب السابق ، بالنسبة لطريقة عرض الموضوعات وتسلسلها ، ثم ختام كل باب من أبوابه بالأمثلة المحلولة، والمسائل التى تساعد الدارس على استيعاب التطبيقات المختلفة ، الخاصة بما ورد فى هذا الباب ، لكى تكون الدراسة على أساس تكنولوجى سليم .

ولا يفوتنى أن أنوه هنا بالجهود المشكورة ، التى يبذلها الناشر منشأة المعارف (جلال حزى وشركاه) ، فى سبيل تيسير المهمة التى أخذتها على عاتقى ، وأن أشكر رجال شركة الاسكندرية للطباعة والنشر ، وكل من عاون فى اخراج الكتاب بهذا الشكل المشرف الجميل .

نسأل الله تعالى السداد والتوفيق فى كل مانرجوه ، إنه نعم المولى ، ونعم النصير .

الاسكندرية فى ذى القعدة ١٣٩٢ يناير ١٩٧٣ دكتور محمد احمد قمر



الباب الأول

ملفات المنتج فى آلات التيار المتردد

(armature Windings in alternating current Machines)

قواعد عامة :

يمثل المنتج (armature) فى آلات التيار المتردد العضو الثابت (stator) للآلة عادة ، على عكس ما هو مألوف فى آلات التيار المستمر ، حيث يكون المنتج هو العضو الدائر (rotor) فى الآلة ، وذلك فى حالة آلات التيار المتردد متوسطة وكبيرة الحجم ، أما الآلات المتزامنة صغيرة الحجم فتكون على نمط آلات التيار المستمر من هذه الناحية . ويحتوى المنتج على عدد معين من المجارى S وهى التى توضع فيها الموصلات وعددها الكلى z . ومن هذه الموصلات تتكون اللفات التى عددها N ، لفة من كل موصلين ، بحيث يرتبط عدد اللفات بعدد الموصلات بالعلاقة $N = \frac{z}{2}$. تتكون ملفات المنتج التى عددها C من هذه اللفات بحيث يكون $C = \frac{N}{2n}$ حيث n هى عدد اللفات فى كل ملف . ولا تختلف هذه القواعد كلها عن مثيلاتها التى مرت بنا عند دراسة ملفات المنتج فى آلات التيار المستمر . إلا أنه بينما نجد أن الملفات تكون من النوع مزدوج الطبقة (two layer winding) بدون استثناء فى آلات التيار المستمر ، نجد أن الملفات يمكن أن تكون فى آلات التيار المتردد أيضا من النوع أحادى الطبقة (single layer Winding) . هذا كما أنه فى آلات التيار المتردد لاتحتل الطبقة الواحدة فى المجرى ، سواء كانت علوية أو سفلية ، أو كانت مفردة ، سوى جانب

واحد من جوانب الملفات . وفى هذه الحالة نجد أن عدد الملفات يساوى عدد المجارى ($S = C$) فى آلات التيار المتردد التى تحتوى على ملفـــات مزدوجة الطبقة ، بينما نجد أن عدد الملفات يساوى نصف عدد المجارى ($C = \frac{S}{2}$) فى الآلات التى تحتوى على ملفات أحادية الطبقة .

ونظراً لأن آلات التيار المتردد التى نحن بصـــدد دراستها تكون ثلاثية المراحل (أو الأوجه) (3 — phase) تقسم المجارى على المراحل الثلاث بالتساوى ، وكذلك الملفات واللفات ، بحيث يخص كل مرحلة نفس العـدد من المجارى ، وبالتالى من الملفات واللفات ، تحت كل قطب من أقطاب الآلة البالغ عددها $2p$ فاذا رمزنا لعدد المجارى لكل مرحلة تحت كل قطب بالرمز q نجد أن $q = \frac{S}{3 \times 2p}$ ، بينما نجد أن عدد اللفات T_{ph} فى كل مرحلة $\frac{N}{3} = \frac{z}{6}$

فاذا كان u هو عدد الموصلات فى كل مجرى نجد أنه فى حالة الملفـــات مزدوجة الطبقة يكون :

$$T_{ph} = \frac{z}{6} = \frac{uS}{6} = \frac{uC}{6} = \frac{Cn}{3} = \frac{Sn}{3} = qup \quad \ldots\ldots \quad (١—١)$$

أما فى حالة الملفات أحادية الطبقة فنجد أن :

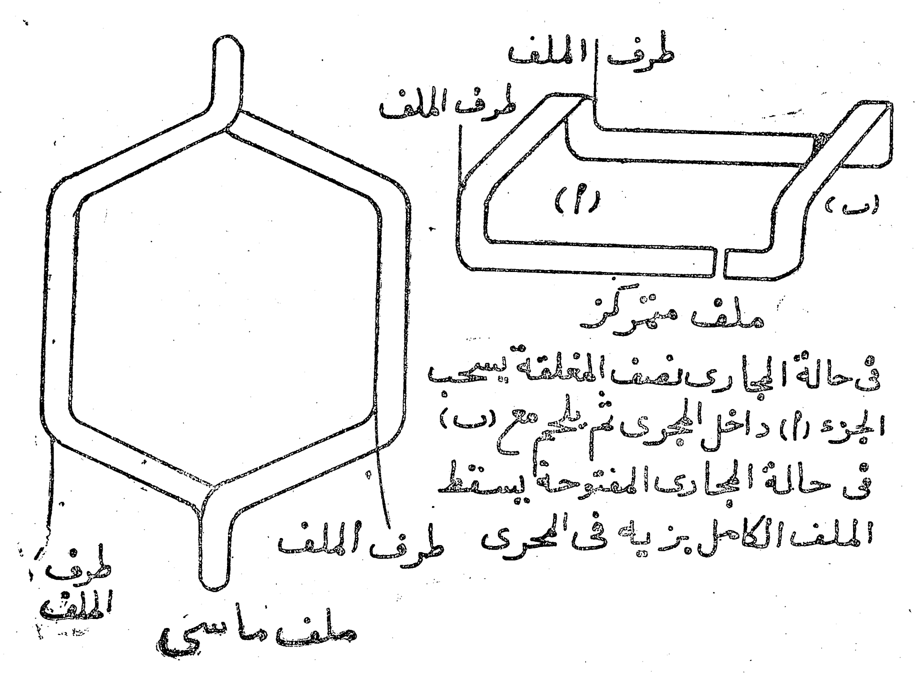
$$T_{ph} = \frac{z}{6} = \frac{uS}{6} = \frac{uC}{3} = \frac{Cn}{3} = \frac{Sn}{6} = qup \quad \ldots\ldots \quad (١—٢)$$

نفترض دائماً ، على أساس من الواقع العمـــلى ، أن التوزيع الفراغى (space distribution) لكثافة الخطوط المغناطيسية عبارة عن منحنى جيبى على مدى الخطوة القطبية ، بحيث تكون قيمة الكثافة فى نهايتها العظمى عند منتصف القطب ، وصفر عند خط التعادل بين كل قطبين . هـذا يعنى أن القوة الدافعة

الكهربية للموصلات فى المجرى الواحد تبلغ نهايتها العظمى فى القيمة عندما يمر محور القطب أمام المجرى ، وتتناقص على منحنى جيبى حتى تصبح صفراً عندما يمر محور التعادل بين القطبين أمام الموصل . وهذا كله على أساس أن سرعة دوران الأقطاب الموجودة على العضو الدائر ثابتة ، وهى عبارة عن سرعة التزامن n_s (Synchronous speed) . ويرتبط تردد القوة الدافعة الكهربية f المتولدة فى الموصلات على هذا النحو ، وتردد ما يمكن أن ينتج عنها من تيارات كهربية بالعلاقة المعروفة $f = p\ \frac{n_s}{60}$ (راجع البنود الخمسة الأولى فى الباب الثالث من المبادىء الأساسية وآلات التيار المستمر) .

يتضح مما سبق ذكره أن القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى جوانب الملفات تختلف عن بعضها البعض مرحليا على حسب مواقعها فى المجارى . ويمكن فى هذه الحالة إتخاذ مجموع القوى الكهربية المتولدة فى الموصلات التى يتكون منها جانب الملف ، والتى تقع فى نفس المجرى ، كوحدة (وهى تساوى القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى موصل واحد مضروبة فى عدد الموصلات فى جانب الملف وهو n) ، وذلك على أساس أن القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى الموصلات الموجودة فى نفس المجرى متفقة معاً مرحلياً (in phase) . سوف نعتبر على هذا الأساس أن جانب الملف هو الوحدة التى نستخدمها عند إجراء عملية لف المنتج ، ونرمز له بمتجه يمثل طوله مجموع القوى الدافعة الكهربية المتولدة فى الموصلات التى يتكون منها وهى فى نهايتها العظمى . لذلك سوف نقوم باجراء عملية اللف باعتبار أن الموصلات قد تم تحويلها إلى ملفات جاهزة ذات شكل معين (سوف ندرس تأثير هذا الشكل على طريقة اللف فيما بعد) ، يحتوى كل منها على عدد معين من اللفات n ، ولكل منها نهايتان (two terminals) ، تعتبر احداهما بدايته

(start) ، والأخرى منتهاه (Finish) . وتستخدم هاتان النهايتان لتوصيل الملفات ببعضها البعض عند إجراء عملية لف المنتج . يبين شكل (١ — ١) الأشكال المعتادة لمثل هذه الملفات .



شكل (١ — ١)

بخصوص وضع جانبى الملف الواحد بالنسبة لبعضها على محيط المنتج ، يوجد نوعان من الملفات يتحدد بناء على ذلك ، وهما :

١ — الملفات كاملة الخطوة (Full Pitch Windings) : يراعى فى هذه الحالة أن يكون اتساع الملف (coil span) ، وهى عبارة عن المسافة التى يحصرها الملف بين جانبيه على محيط المنتج ، تبلغ خطوة قطبية كامله . ويقال الملف حينئذ إنه ملف كامل الخطوة (Full pitch coil) . وينتج عن ذلك أن تكون القوى الدافعة الكهربية المتوالدة فى أحد جانبى الملف مختلفة مرحلياً عن

تلك التى تتولد فى الجانب الآخر بزاوية مقدارها 180° (أو π زاوية كهربية نصف قطرية) تماما ، مما يجعلنا نجمع مقادير هذه القوى جميعها عدديا لكى نحصل على القوة الدافعة الكهربية الكلية التى يعطيها الملف بأكمله ، كما سبق أن فعلناه فى حالة آلات التيار المستمر .

٢ — الملفات كسرية الخطوة (Fractional Pitch Windings) : ويطلق عليها أيضا الملفات الوترية (Chorded Windings) ، ويختلف اتساع الملف فى هذه الحالة عن خطوة قطبية كاملة . فقد يكون أقل من ذلك وهو الغالب ، وقد يكون أكبر (وهذا ممكن من الناحية النظرية فقط ، ولا يطبق عملياً بسبب الزيادة التى لا فائدة منها فى التوصيلات الطرفية للملفات) ويقال للملف حينئذ إنه ملف وترى (chorded coil) . ويتوقف تغيير اتساع الملف عن الخطوة القطبية الكاملة على إعتبارات تتعلق بمنحنى القوة الدافعة الكهربية المرحلية (Wave form of phase voltage) وتوافقيات الضغط (Voltage Harmonics) التى يحتوى عليها ، كما سنبين بالتفصيل فى حينه المناسب . ولكن يمكننا أن نذكر الآن أن اتساع الملفات الوترية يكون فى العادة ثلثى الخطوة القطبية للتخلص من توافقية الضغط الثالثة (Voltage third harmonic) فى منحنى الضغط المرحلى . وعلى حسب اختلاف اتساع الملف عن الخطوة القطبية نجد أن المتجه الذى يمثل مجموع القوى الدافعة الكهربية فى أحد جانبى الملف يختلف مرحلياً عن المتجه الذى يمثل مجموع القوى الدافعة الكهربية فى جانب الملف الآخر بزاوية أقل من 180° درجة كهربية ، بحيث تكون قيمة القوة الدافعة الكهربية الكلية التى نحصل عليها من الملف أقل من ضعف قيمة أحد هذين المتجهين كما كان فى الحالة السابقة . وفى هذه الحالة يجب جمع المتجهين ، مع اعتبار زاوية الإختلاف المرحلى بينهما ، للحصول على القوة الدافعة الكهربية الكلية التى يعطيها الملف .

يستلزم الحصول على تخطيط يبين ترتيب الملفات فى مجارى العضو الثابت لآلة التيار المتردد ثلاثية المراحل أن نفرق أساساً بين نوعين من الملفات ، وهما الملفات أحادية الطبقة ، والملفات مزدوجة الطبقة ، وفى كلتا الحالتين تستعين بما يسمى مخطط نجمة المجارى (Slots star diagram) .

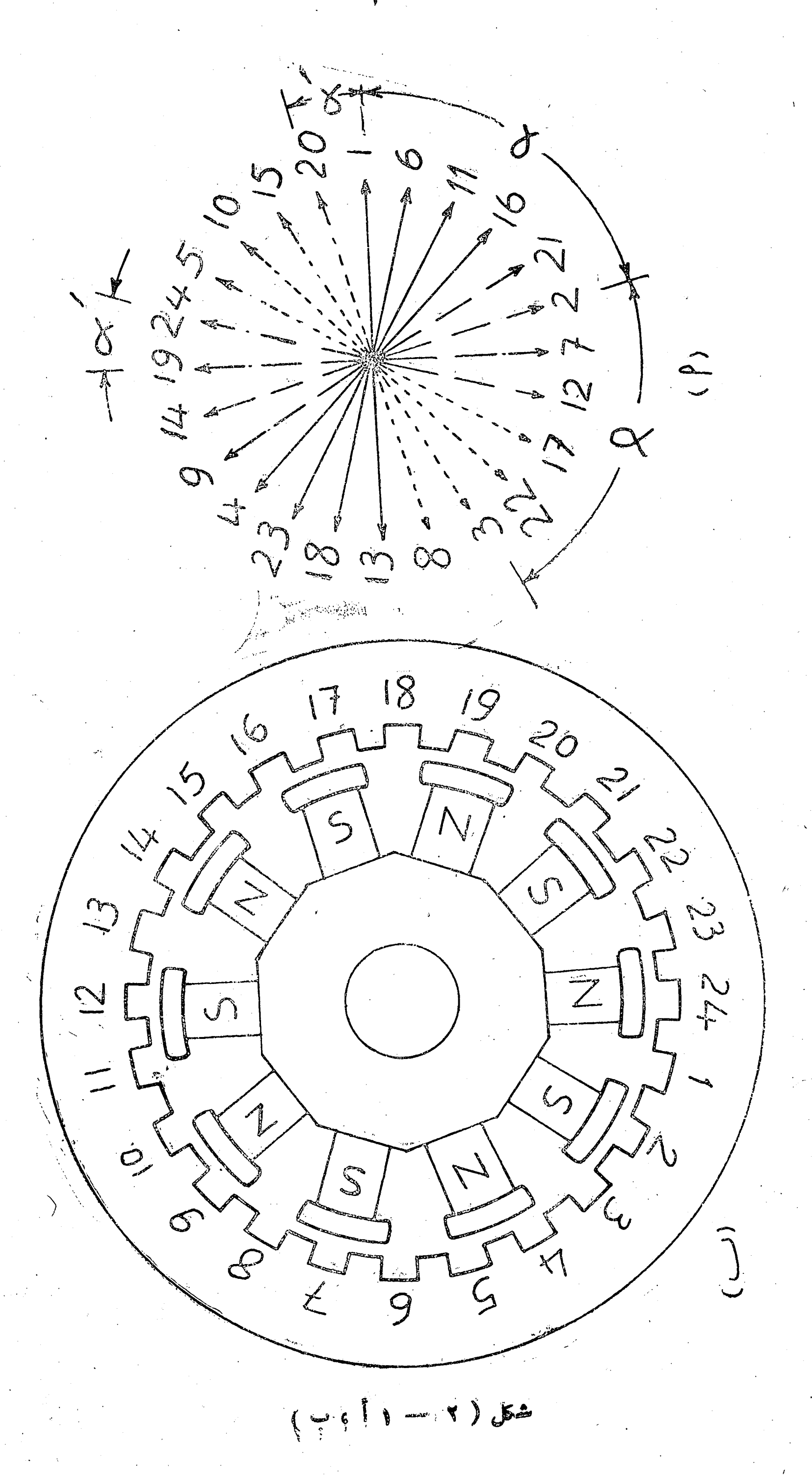
أولا — الملفات أحادية الطبقة

مخطط نجمة المجارى :

يحتل كل جانب من جوانب الملفات ، فى حالة الملفات أحادية الطبقة ، مجرى بأكمله . ويمثل جانب الملف ، أو المجرى فى هذه الحالة ، بمتجه يتناسب طوله مع مجموع مقادير القوى الدافعة الكهربية المتولدة فى الموصلات التى يحتوى عليها هذا الجانب وهى فى قيمة النهاية العظمى لها ، كما سبق شرحه . ويمكن تحديد مجرى معين وإعطاؤه رقم 1 واعتبار أن متجه القوة الدافعة الكهربية لجانب الملف الراقد فيه منطبقا على المحور المرجعى (reference axis) فى مخطط المتجهات ، على أساس أن محور التعادل بين قطبين فى الآلة قد انطبق على محور هذا المجرى فى اللحظة المفروضة ، شكل (٢ — ١ ب) ، الذى يبين آلة ذات عشرة أقطاب ومنتج يحتوى على أربعة وعشرين مجرى .

إذا أعطينا المجارى أرقاما متسلسلة على حسب ترتيبها مع المجرى رقم 1 ، كما هو مبين على نفس الشكل ، نجد أن زاوية الاختلاف المرحلى بين متجهات القوى الدافعة الكهربية لجوانب الملفات فى المجارى المتعاقبة هى نفس الزاوية الكهربية α الواقعة بين كل مجريين متتالين ، وقيمتها فى هذه الحالة هى :

$$\alpha = \frac{360\ p}{S} = \frac{360 \times 5}{24} = 75 \quad \text{درجة كهربية}$$



شكل (٢ — ١ أ، ب)

يبين شكل (٢ــ١ أ) مخطط متجهات القوى الدافعـــة الكهربية لجوانب الملفات وعلى كل منها رقم المجرى الذى يوجد به جانب الملف المناظر ، وهذا هو ما يطلق عليه عادة اسم مخطط نجمة المجارى .

نلاحظ أننا نحصل فى مخطط المتجهات هذا على عدد من المتجهات يساوى عدد المجارى S وهو 24 ويفصل بين كل اثنين منها الزاوية α' حيث :

$$\alpha' = \frac{360}{S} = \frac{360}{24} = 15 \quad \text{درجة}$$

أى أننا نستطيع رسم مخطط نجمة المجارى لهـــذه الآلة برسم عدد S من المتجهات ذات الأطوال المتساوية التى يفصل بين كل اثنين منهـا الزاوية α' . نختار من هذه المتجهات واحداً ونضع عليه الرقم 1 بما يعنى أننا اخترنا أحد المجارى لكى نبدأ عنده اللف وأعطيناه هـذا الرقم أيضـا . ويكون متجه القوة الدافعة الكهربية لجانب الملف الواقع فى المجرى رقم 2 ، التالى للمجرى رقم 1 فى اتجاه الدوران ، وهو الذى يعطى الرقم 2 أيضا فى مخطط نجمة المجارى ، واقعاً بعد زاوية مقدارها α من المتجه رقم 1 ، وهكذا . ويلاحظ فى هذا المضمار أن α مكرر صحيح لـ α' وأن درجة التكرار هى العدد الصحيح p حيث $\alpha = p\alpha'$ وهذا كله موضح فى شكل (٢ــ١ أ) .

يلاحظ أن قيمة q فى هذه الحالة كسراً ، حيث $q = \frac{4}{5}$ لذلك نحصل على ملفات ذات خواص معينة ، سوف نبحثها بالتفصيل فيما بعد ، ويطلق عليها اسم الملفات كسرية المجرى . ولكن ما يعنينا فى الوقت الحاضر من هذا المثال هو الطريقة التى تتبع فى رسم مخطط نجمة المجارى ، وكيفية استخدامه لتحـــديد جوانب الملفات الخاصة بالمراحل المختلفه . هذا وسوف تجد توصيل الملفات لهذا

المثال مبينا فى شكل (٢٠—١ ح) مع الجزء الخاص بالملفات كسرية المجرى .
وقد استعنا لهذا الغرض بطبيعة الحال بمخطط نجمة المجارى فى شكل (٢—١ أ) .

إذا كانت كل من p , S تقبل القسمة على معامل مشترك بينهما هو F فان هذا يعنى أن هناك تكراراً لأوضاع المجارى بالنسبة لأزواج الأقطاب درجته F ، مما يترتب عليه أن يكون هناك F مجموعة من المجارى تحتل كل منها وضعاً مماثلا للأخرى بالضبط بالنسبة للأقطاب المغناطيسية . وفى هذه الحالة يصبح فى كل مجموعة مجرى يحتل نفس الوضع بالنسبة للأقطاب المغناطيسية كذلك الذى يحتله نظيره فى كل مجموعة من المجموعات الأخرى . وهذا يستلزم أن تكون متجهات القوى الدافعة الكهربية لجوانب الملفات فى هذه المجارى المتناظره التى عددها F متساوية فى القيمة ومتفقة معاً مرحلياً تمام الإتفاق ، مما يعنى أن المتجهات التى عددها S فى مخطط نجمة المجارى سوف تنقسم إلى مجموعات متماثلة عددها F ، بحيث ينطبق كل متجه فى إحدى المجموعات على نظائره من المجموعات الأخرى . ويكون الاجراء الخاص برسم مخطط نجمة المجارى فى هذه الحالة بأن نبدأ أولا بتحديد عدد المجموعات المتكررة F بايجاد العامل المشترك الذى تقبل كل من p , S القسمة عليه ، فيكون عدد المتجهات التى نحتاج إلى رسمها فى مخطط نجمة المجارى هو $\frac{S}{F}$ فقط ، يأخذ كل منها فى الترقيم F رقماً ، دالة على متجهات القوى الدافعة الكهربية فى F من المجارى المتماثلة الوضع بالنسبة للاقطاب المغناطيسية فى الآلة . وتكون قيمة الزاوية α' التى تفصل بين كل متجهين من هذه المتجهات هى .

$$\alpha' = \frac{360}{S/F} = \frac{360\,F}{S} \quad \text{درجة} \qquad (٣-١)$$

نأخذ مثالا على ذلك آلة تحتوى على $S = 24$, $2p = 4$ لنجد أن $p = 2$ ويكون هناك عامل مشترك $F = 2$ تقبل كل من S , p القسمة عليه . نحصل على كل من α,α' فى هذه الحالة على النحو التالى .

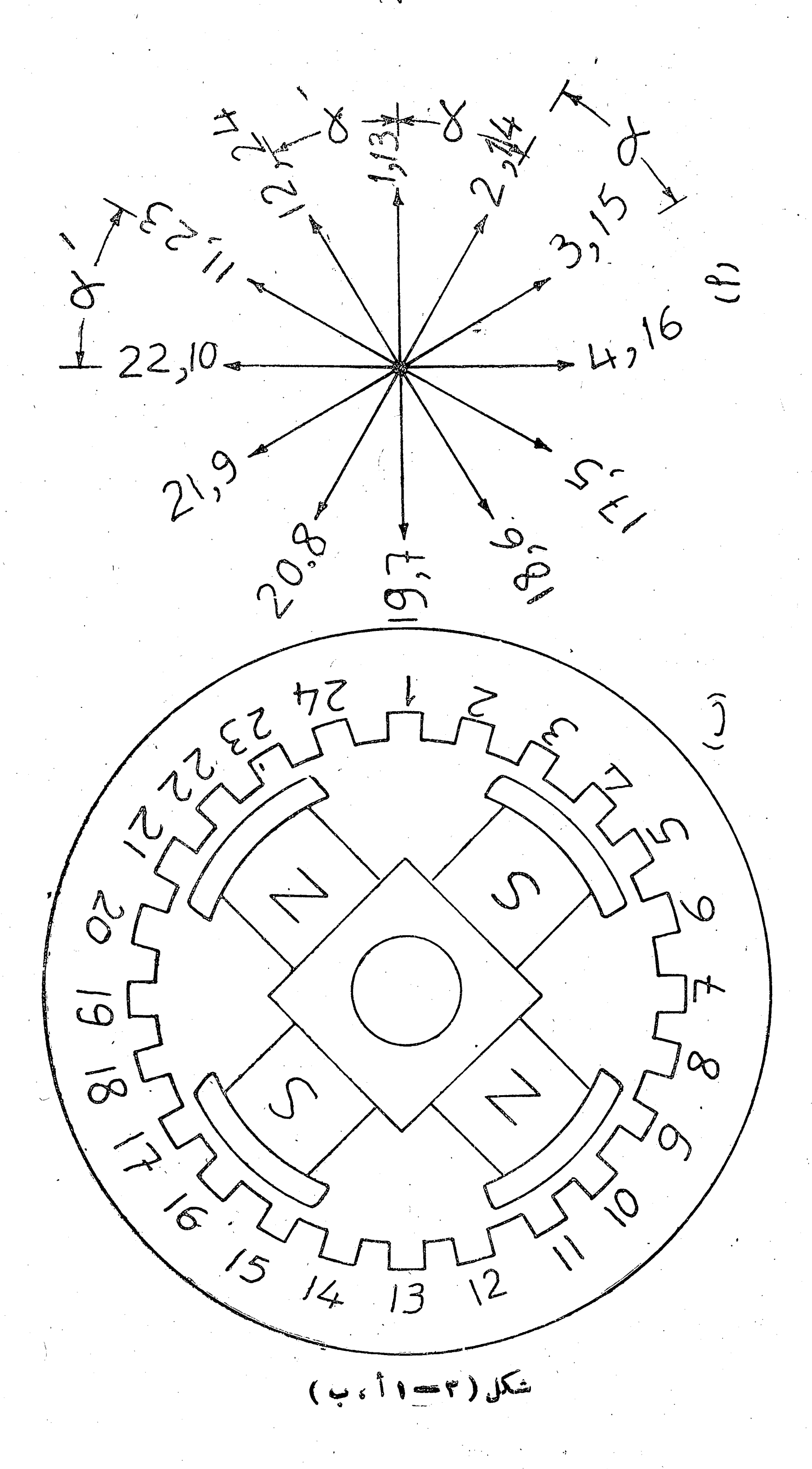
$$\alpha = \frac{360 \times 2}{24} = 30^\circ \quad , \quad \alpha' = \frac{360 \times 2}{24} = 30^\circ$$

وسوف نحصل على $12 = \frac{S}{F}$ متجها فى مخطط نجمة المجارى ، يفصل بين كل اثنين منها الزاوية $\alpha' = 30^\circ$ ، ويحمل كل واحد منها $F=2$ رقماً ، مما يدل على أنه يمثل القوة الدافعة الكهربية لجانبين من جوانب الملفات يقعان فى مجريين يتخذان دائماً موضعين متماثلين تماما بالنسبة لمجموعة الأقطاب المغناطيسية.

يبين شكل (٣ـــ١ أ ، ب) مخطط نجمة المجارى وأوضاع المجارى بالنسبة لمجموعة الأقطاب المغناطيسية فى هذه الحالة ، حيث يلاحظ أن المجرى رقم $x + \frac{S}{F}$ يأخذ وضعاً مماثلا تماما للمجرى رقم x ، أى أن المجرى رقم 1 يناظر المجرى رقم $13 = 1 + 12$ والمجرى رقم 5 يناظر المجرى رقم $17 = 5 + 12$ وهكذا ، كما أن هناك مجموعتين ($F = 2$) من المجارى متماثلتين فى وضعها تماما بالنسبة لمجموعة الأقطاب المغناطيسية ، وهما مجموعة المجارى من 1 إلى 12 ومجموعة المجارى من 13 إلى 24 . لذلك نجد أن متجهى القوة الدافعة الكهربية للمجريين 1 و 13 منطبقان معا فى مخطط نجمة المجارى ، وكذلك بالنسبة للمجريين 2 و 14 ثم 3 و 15 ، وهكذا .

تكوين مجموعات الملفات (Coil Groups) والمراحل (phases) :

بعد تحديد الأوضاع المرحلية للقوى الدافعة الكهربية المتولدة فى جوانب الملفات فى المجارى المختلفة على الآلة ، باستخدام مخطط نجمة المجارى ، نستطيع


(أ)
1,13
2,14
3,15
4,16
17,5
18,6
19,7
20,8
21,9
22,10
11,23
12,24
(ب)
N
S
S
N
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24

شكل (٣ـ١ أ، ب)

الآن بالتوصيل المناسب بين كل جانبين من جوانب هذه الملفات معاً تكوين الملفات، كما نستطيع أيضا بالتوصيل المناسب بين هذه الملفات، وجمعها فى مجموعات، تكوين المراحل المطلوبة . ونهتدى فى هذه العمليات كلها بالقواعد التى تحكم هذه التوصيلات ، والتى تعتمد غالبا على تحديد أوضاع مرحلية معينة ، كما سبقت الاشارة اليه فى مواضع متفرقة .

بالنسبة لتكوين الملفات يتحدد جانبا الملف المناسبان لتوصيلهما معاً بناء على تحديد اتساع الملف أو خطوة الملف (winding pitch) . فاذا كانت الملفات المطلوبة كاملة الخطوة ، فان هذا يعنى ضرورة توصيل كل جانبين من جوانب الملفات معاً ، عندما يتبين من مخطط نجمة المجارى أنهما يولدان قوتين دافعتين كهربيتين بينهما اختلاف مرحلى مقداره 180 درجة كهربية بالضبط . ومن المهم جداً أن نراعى عمل أقصر التوصيلات بطريقة مدروسه ، بحيث نحصل على ملفات منتظمة الترتيب ، ومتماثله بالنسبة لمراحل الآله المختلفة . ولتوضيح ذلك نكمل حل المثال الأخير الخاص بشكل (٣ — ١) .

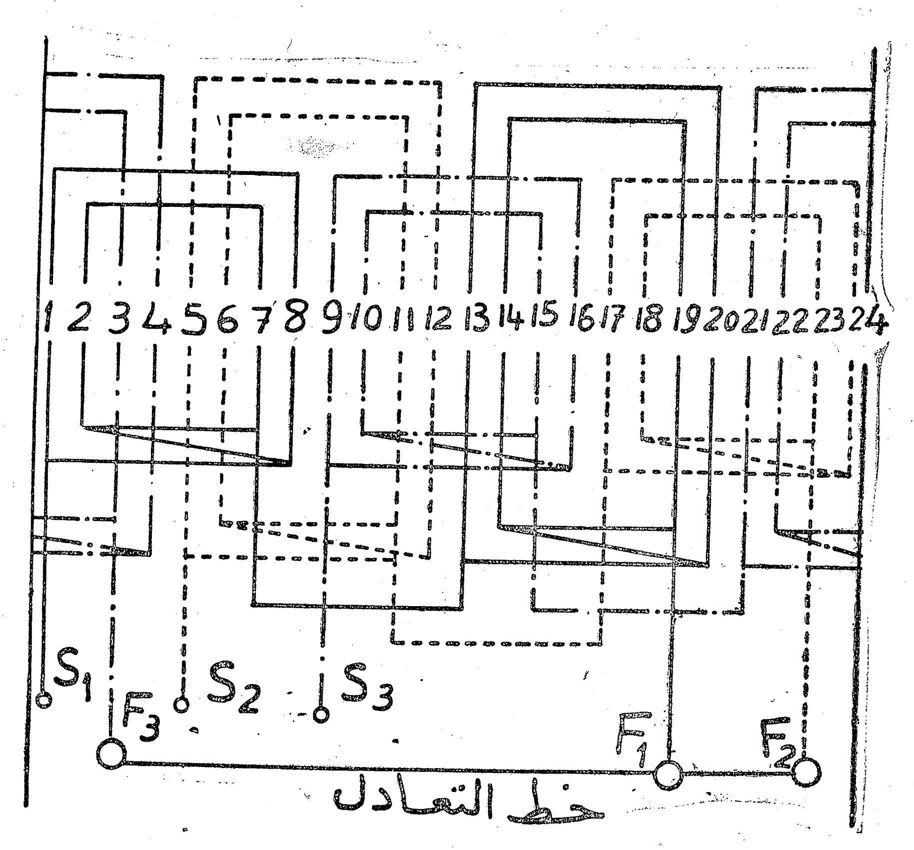
بالرجوع إلى مخطط نجمة المجارى فى شكل (٣ — ١ أ) نجد أن أقصر التوصيلات لتكوين الملفات تكون من 1 إلى 7 ومن 2 إلى 8 ومن 3 إلى 9 ، وهكذا . ونجد فى هذه الحالة أن $p = 2$ بالنسبة للآلة ثلاثية المراحل ، مما يعنى أن كل مرحلة سوف تختص بمجريين تحت كل قطب ، وهذا يؤدى إلى وجود ملفين لكل مرحلة فى كل خطوتين قطبيتين . يوصل هذان الملفان على التوالى معاً ويطلق عليهما معاً اسم مجموعة ملفات ، وبذلك يصبح فى كل مرحلة عدد p من مجموعات الملفات (أثنان فى هذا المثال) تحتوى كل منها على عدد p من الملفات (أثنان أيضا فى هذا المثال) . وتوصل مجموعات الملفات فى كل مرحلة على التوالى معاً .

إلى هنا استطعنا ، بالإستعانة بمخطط نجمة المجارى ، تكوين الملفات ، كما قمنا بتقسيم هذه الملفات إلى مجموعات متماثلة ، ثم وزعنا هذه المجموعات المتماثلة على المراحل الثلاث فى الآلة بأنصبة متساوية . ولكن تكوين هذه المراحل بالأسلوب الصحيح يستلزم أن نحدد بداياتها ونهاياتها بحيث يتحقق شرط الاختلاف المرحلى المطلوب بينها ، وهو فى هذه الحالة ١٢٠ درجة كهربية . فاذا كانت المرحلة الأولى تبدأ بجانب الملف الواقع فى المجرى رقم 1 يجب أن تبدأ المرحلة الثانية بجانب الملف الذى يقع فى مجرى يبعد عن المجرى رقم 1 بزاوية مقدارها 120 درجة كهربية . ويتم تحديد هذا المجرى على النحو التالى :

مقدار الزاوية بين كل مجريين بالدرجات الكهربية هى :

$$\alpha = \frac{360 \times p}{S} = \frac{360 \times 2}{24} = 30^\circ$$

فيكون عدد المجارى اللازم تخطيها لعمل زاوية اختلاف مرحلى 120 درجة كهربية هو $4 = \frac{120}{30}$ ، بمعنى أن بداية المرحلة الثانية تقع فى المجرى رقم $5 = 4 + 1$. وعلى هذا الأساس فان بداية المرحلة الثالثه سوف تقع فى المجرى رقم $9 = 4 + 5$. وإذا حدث أن $\frac{120}{\alpha}$ لاتنتج عدداً صحيحاً من المجارى ، نحاول تخطى $\frac{120 + 360}{\alpha}$ من المجارى إذا كانت عدداً صحيحاً أو $\frac{120 + 720}{\alpha}$ ، وهكذا ، وذلك على أساس أننا يجب أن نتخطى عدداً صحيحاً من المجارى لتعيين بداية المرحلة التالية . فاذا تعذر ذلك فان هذا يعنى أن اللف غير قابل للتنفيذ ، ويجب إعادة تصميم الآله من جديد للحصول على القيم المناسبة لكل من S , 2p .

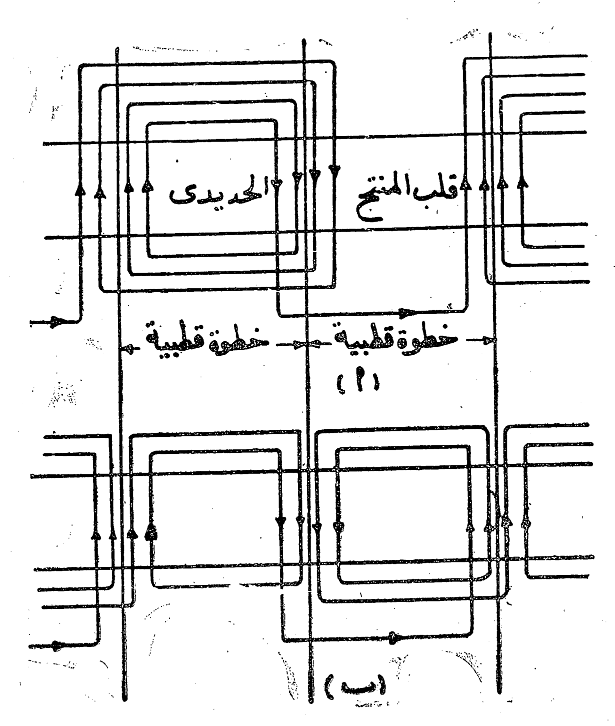


شكل (٤ — ١)

يبين شكل (٤ — ١) الرسم التخطيطى للملفات بعد تنفيذها على النحو السابق.

بقى لكى نستكمل هذا الموضوع أن نشير إلى الإجراءات التى تتخذ لترتيب التوصيلات الطرفية (End Connections) للفات التى تتكون منها التوصيلات المعلقة (Overhangs) للملفات ، بحيث لا تتضارب التوصيلات المعلقة لمجموعات الملفات المختلفة فى مواضعها على جانبى الآلة . وهذا يستدعى شرح الطرق المختلفة التى استقر الاتفاق عليها بالنسبة لتشكيل الملفات عند تكوينها ، بحيث تعطى عند وضعها فى المجارى التنظيم المطلوب . ويجب أن نميز فى هذا المضمار بين نوعين أساسيين من أنواع الملفات وهما :

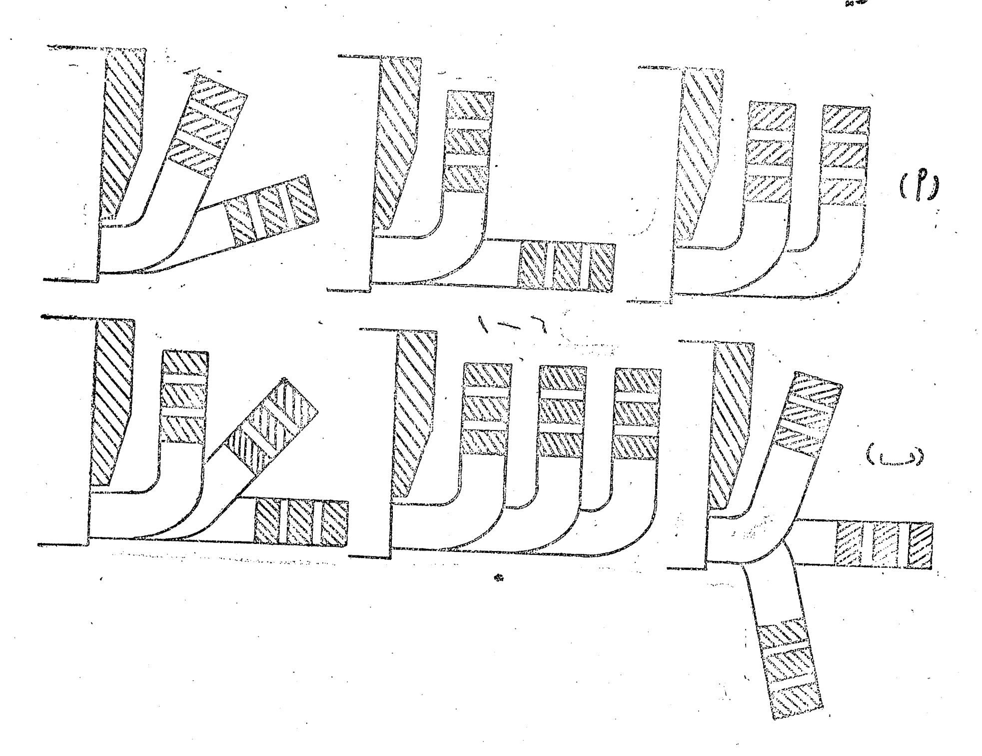
١ — الملفات المتمركزة (Concentric coils) : تكون الملفات فى هذه الحالة مستطيلة الشكل ، ويكون اتساع الملف مختلفاً بالنسبة لملفات المجموعة الواحدة ، بشرط أن يكون الاتساع بالنسبة للمجموعة بأكلها هو الاتساع المطلوب (أى خطوة قطبية كاملة فى الملفات كاملة الخطوة) ، هذا بينما يمكن أن يكون اتساع أى ملف فى المجموعة أقل أو أكثر من الاتساع المطلوب . شكل (٥ — ١ أ ، ب) يبين شكل هذا النوع من الملفات . نجد فى أ أن كل مجموعة من الملفات توصل على التوالى معاً ، ثم توصل بعد ذلك على التوالى مع المجموعات الأخرى ، وهذا هو النوع العادى من الملفات المتمركزة . بينما نلاحظ فى ب تداخل التوصيل بين جوانب ملفات المجموعات المتتالية ، بحيث تنشطر كل مجموعة إلى اثنتين ، فنحصل



شكل (٥ — ١ أ ، ب)

على ضعف عدد المجموعات . ويقال إن التوصيل فى هذه الحالة متمركز مشطور (split concentric) .

لكى لا تتضارب التوصيلات المعلقة لهذه الملفات ترتب فى مستويات متباعدة ، وذلك عن طريق ثنى جوانب الملفات ، بعد خروجها من المجارى ، على زوايا مختلفة ، كما هو مبين فى شكل (٦ — ١ أ ، ب) . ويمكن أن يتم هذا الترتيب فى مستويين كما هو مبين فى الجزء أ من الشكل ، كما أننا قد نحتاج لذلك إلى ثلاث مستويات ، كما هو مبين فى الجزء ب من الشكل . ويقال فى الحالة الأولى إن

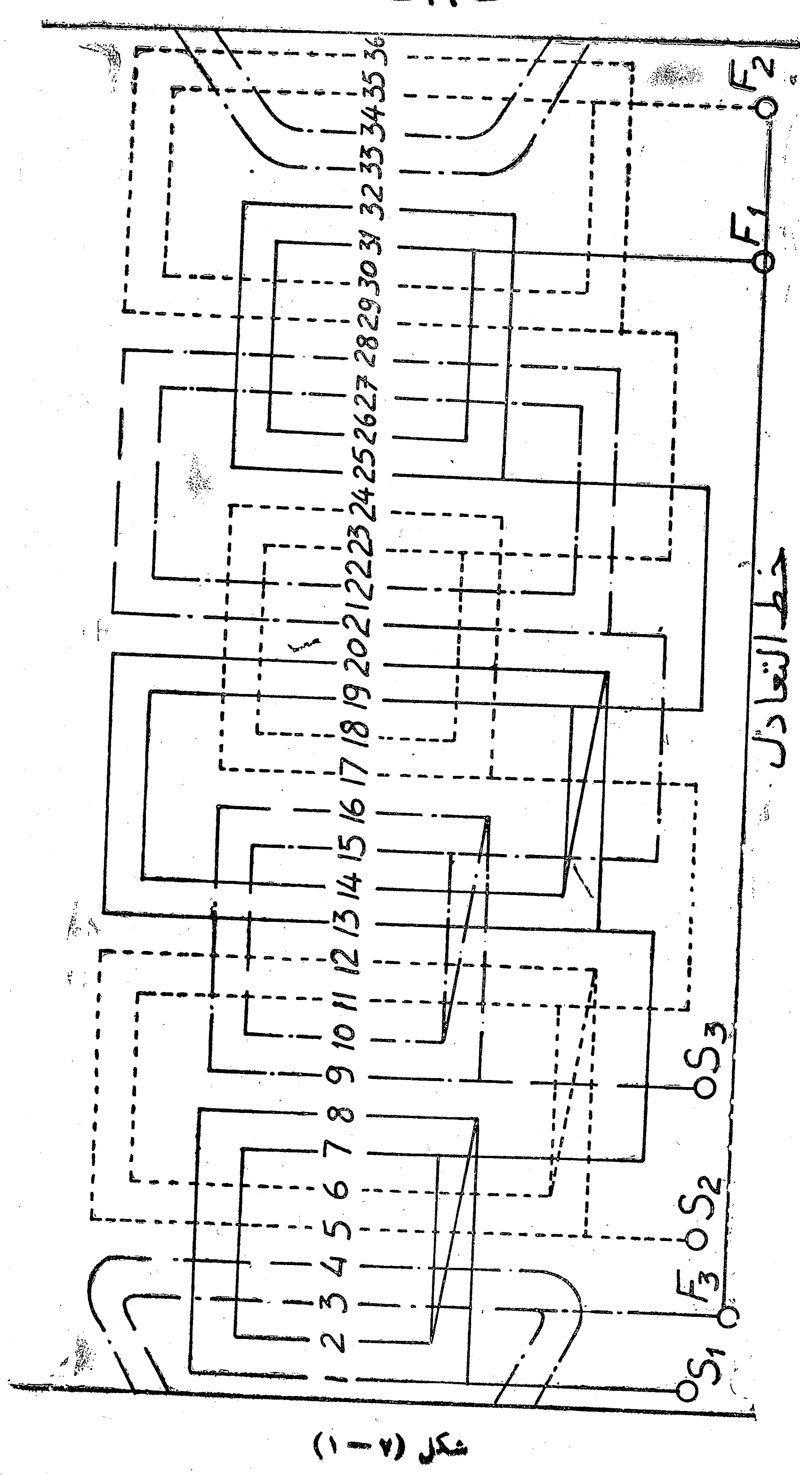


شكل (٦ — ١ أ ، ب)

التوصيلات المعلقة للملفات مرتبة فى مستويين (overhangs arranged in two planes) ، ويقال فى الحالة الثانية إن التوصيلات المعلقة للملفات مرتبة فى ثلاثة مستويات (Overhangs arranged in three planes) . ويتوقف تحديد عدد هذه المستويات على عدد مجموعات الملفات فى كل مرحلة ، حيث يراعى عادة أن توزع مجموعات كل مرحلة بنفس الطريقة على جميع المستويات على قدر الإمكان ، وذلك لكى تصبح المراحل المختلفة متساوية فى قيمة المقاومة ، ومانعة التسرب الحثية . فاذا كان عدد المجموعات فى كل مرحلة زوجياً فاننا نحتاج فى العادة إلى مستويين فقط لترتيب التوصيلات المعلقة ، بحيث يحتل نصف المجموعات فى كل مرحلة أحد المستويين ، ويحتل النصف الآخر المستوى الثانى . يبين شكل (٤ — ١) هذا النوع من اللف بالنسبة للمثال المعطى . ويمكن فى غير ذلك من الحالات ترتيب التوصيلات المعلقة فى ثلاثة مستويات ، كما يمكن فى بعض الأحيان، عندما يكون عدد المجموعات فى المرحلة فرديا، ترتيب المجموعات كلها إلا واحدة (العدد الزوجى) فى مستويين ، ثم ترتيب نصف التوصيلات المعلقة للمجموعة الباقية فى أحد المستويين والنصف الثانى فى المستوى الآخر ، بحيث تأخذ هذه المجموعة شكلا يختلف عن المجموعات الباقية لكى تفى بهذا الغرض . ويقال إن الملفات تحتوى فى هذه الحالة على ملف ملتوى (cranked coil) .

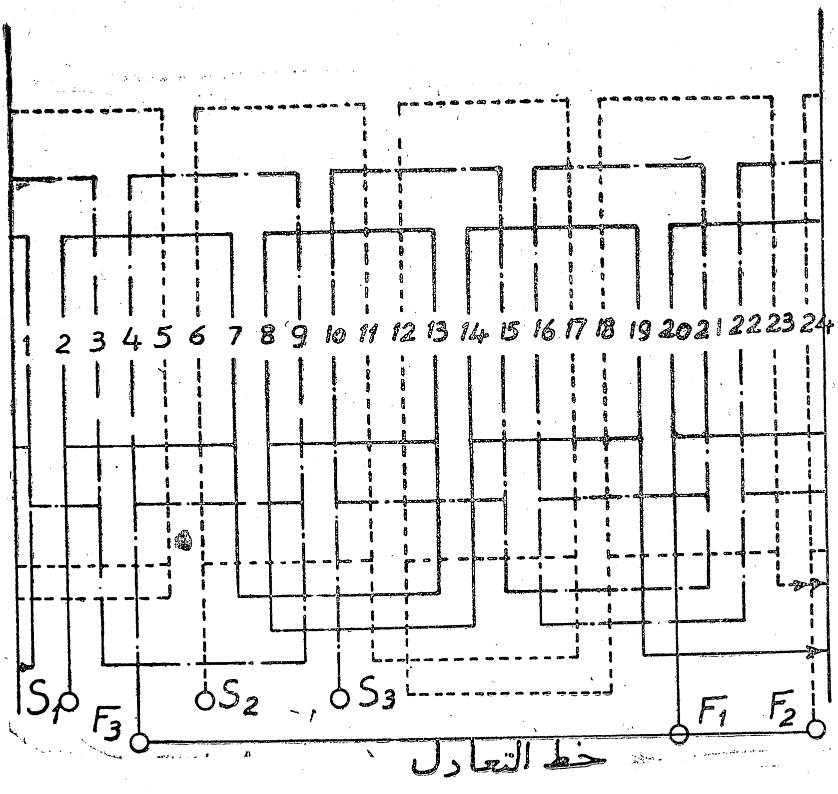
ويبين شكل (٧ — ١) ملفات تحتوى على ملف ملتوى عندما يصبح عدد المجموعات فرديا . وتشبه التوصيلة المعلقة للملف الملتوى فى شكلها تلك التى تكون للملفات الشبكية ، التى سيأتى ذكرها فيما بعد ، وهى المبينة فى شكل (١٢ — ١) .

يبين شكل (٨ — ١) ملفات المثال المعطى عند ترتيب التوصيلات المعلقة



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36
S_1
F_3
S_2
S_3
F_1
F_2
خط التعادل

شكل (٢ – ١)

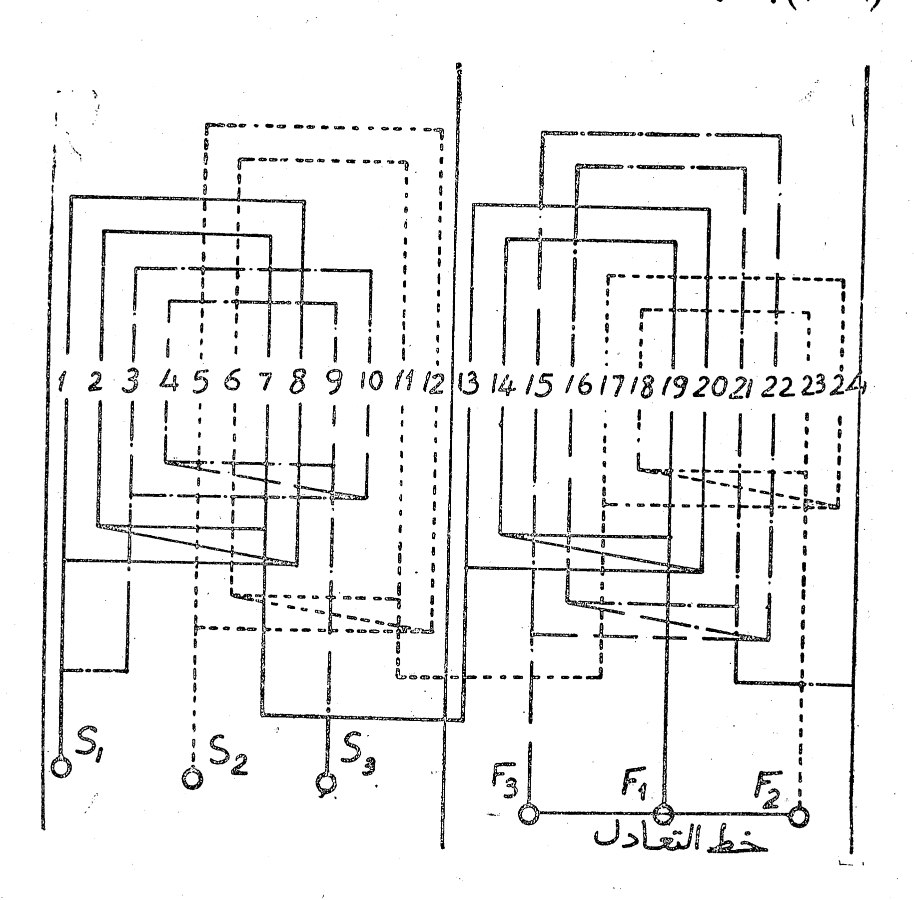


شكل (٨ — ١)

الملفات فى ثلاثة مستويات . ويلاحظ أن الحاجة إلى استخدام ثلاثة مستويات قد نشأت بسبب أن الملفات أصبحت فى هذه الحالة من النوع المتمركز المشطور، وأن ذلك أدى إلى استخدام ملفات ذات شكل واحد فى المرحلة الواحدة .

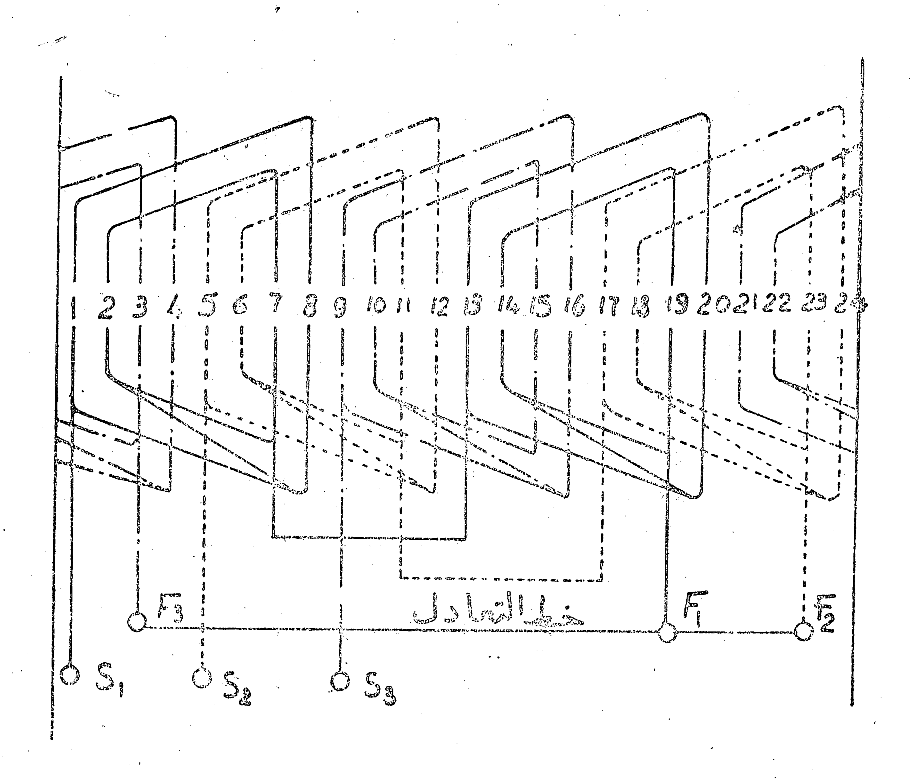
نحتاج إلى ترتيب التوصيلات المعلقة فى ثلاثة مستويات أيضا فى الحالات التى يتكون فيها جسم المنتج الحديدى من نصفين متماثلين ، لكى يسهل نقلها ، حيث يركبان معا فى موضع استخدام الآلة . إذ يجب أن يكون ترتيب التوصيلات المعلقة فى هذه الحالة بحيث تتكون الملفات الجاهزة الصنع من مجموعتين متماثلتين تماما ، يمكن تركيب كل منها فى نصف جسم المنتج على حدة ، وبحيث

لاتكون أية مجموعة من الملفات مشتركة بين النصفين ، كما هو مبين فى شكل (٩ — ١) بالنسبة المثال المعطى .



شكل (٩ — ١)

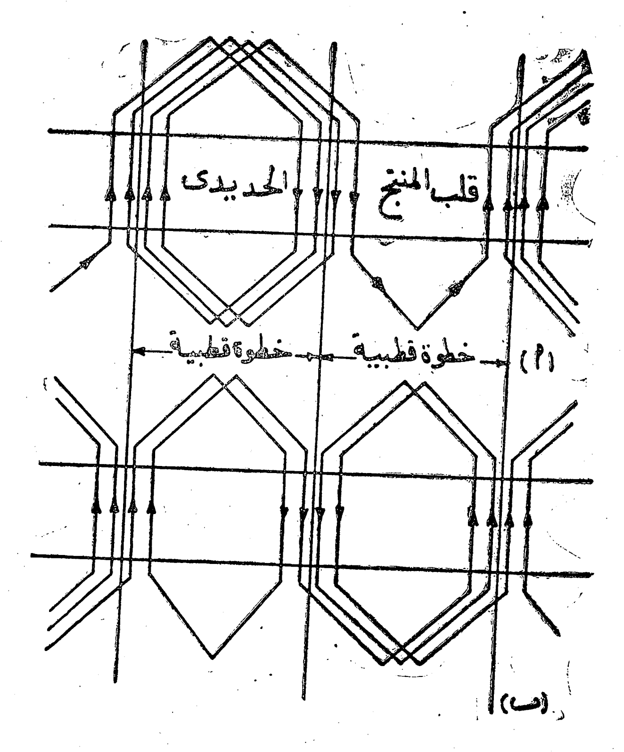
يبين شكل (١٠ — ١) طريقة تنفيذ الف بالنسبة المثال المعطى أيضا، عندما تكون مجموعات الملفات جميعاً ذات شكل واحد ، فتصبح الملفات كلها فى هذه الحالة من النوع الملتوى .



شكل (١٠ — ١)

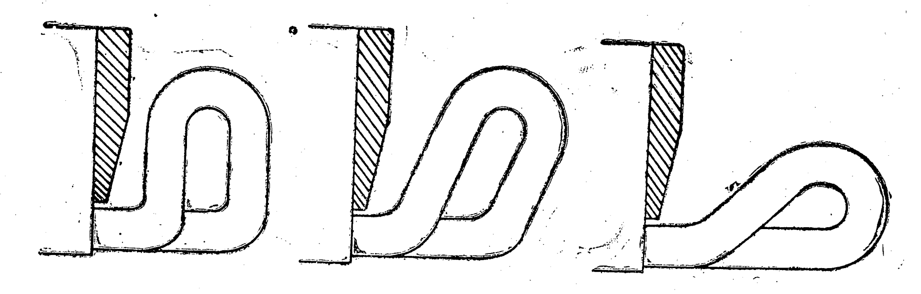
٢ — الملفات الشبكية (Lattice windings) او الماسية (Diamond Windings) :

تأخذ هذه الملفات الشكل الماسى كما هو مبين فى شكل (١ — ١١ أ ، ب) ، ففى أ يوجد النوع العادى من هذه الملفات ، وفى ب النوع المشطور منها (splitt lattice) . يلاحظ أن الملفات تكون فى هذه الحالة ذات اتساع واحد ومتماثلة فى الشكل ، وهى تشبه ملفات المنتج فى آلات التيار المستمر فى حالة اللف الانطباقى ، من حيث الشكل العام ، وترتيب التوصيلات المعلقة على جانبى المنتج . يبين شكل (١٢ — ١) كيف تثنى التوصيلات المعلقة بالطرق المختلفة



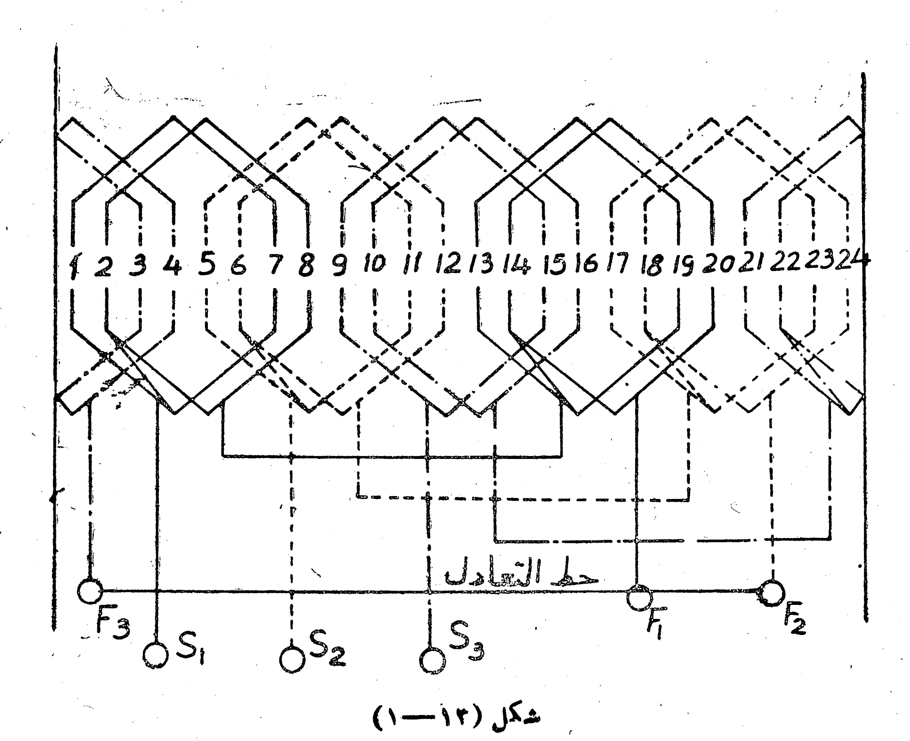
شكل (١١—١ أ ، ب)

لتكوين رءوس الملفات، التى ترص جنبا إلى جنب فى ترتيب دائرى حول محيط المنتج على الجانبين .

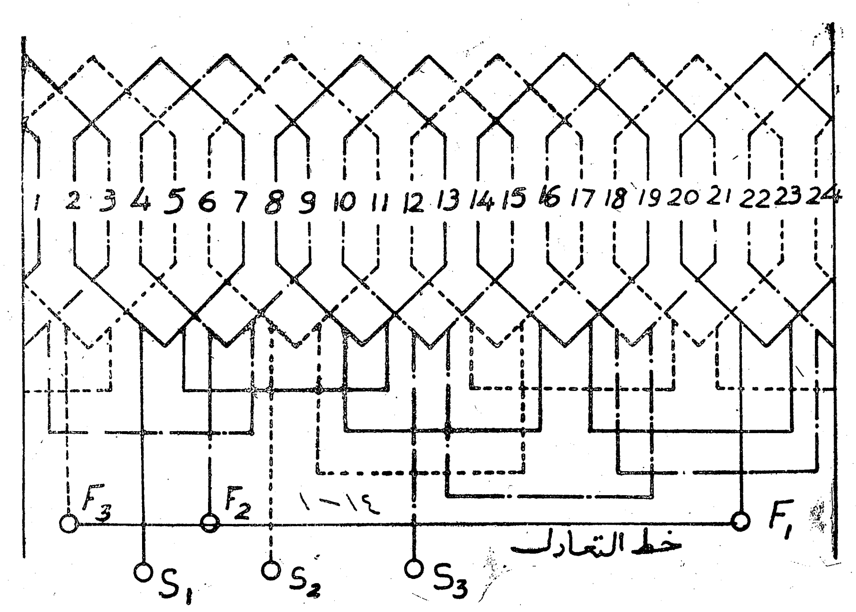


شكل (١٢—١)

يبين شكل (١٣—١) طريقة تنفيذ اللف فى المثال المعطى باستخدام الملفات

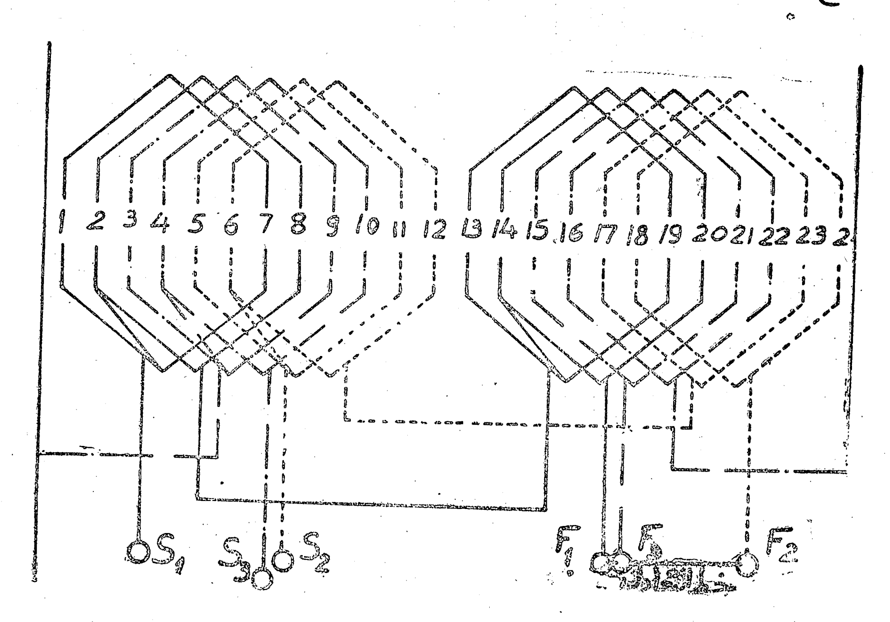


شكل (١٣ — ١)



شكل (١٤ — ١)

الشبكية العادية ، كما يبين شكل (١٤ — ١) كيفية استخدام الملفات الشبكية من النوع المشطور . أما شكل (١٥ — ١) فيبين طريقة التنفيذ لنفس المثال بنفس نوع الملفات عندما يكون جسم المنتج مكونا من جزءين متماثلين .



شكل (١٥ — ١)

توصيل الملفات فى المرحلة الواحدة على التوازى :

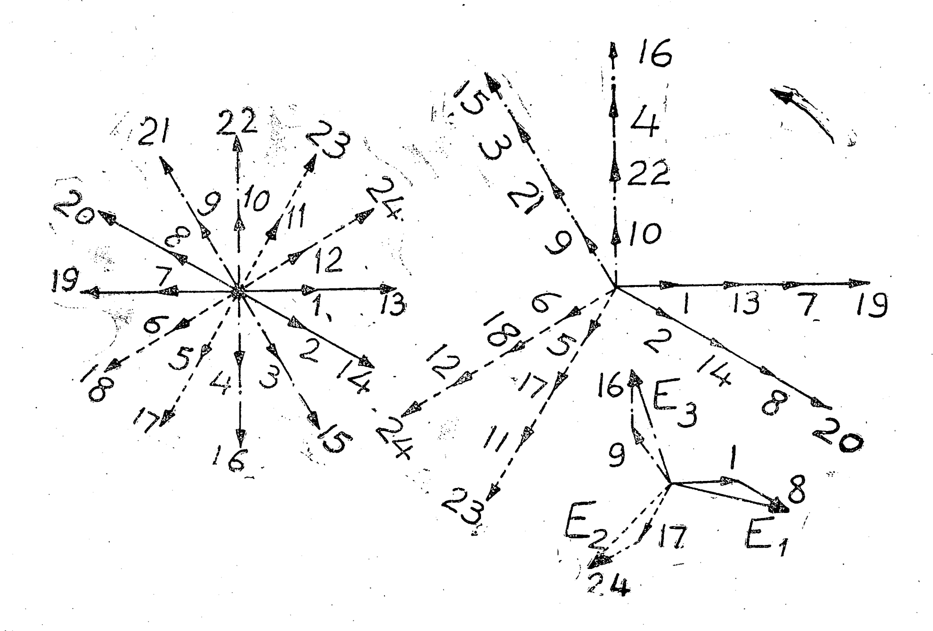
نضطر فى بعض الحالات عندما تكون القوة الدافعة الكهربية صغيرة والتيار كبيراً نسبيا أن نكون مسارات متوازية فى كل مرحلة ، بحيث يوزع التيار المرحلى بالتساوى على هذه المسارات . ويدخل فى حساب القوة الدافعة الكهربية ،فى هذه الحالة،عدد اللفات الموجودة فى الملفات الداخلة فى تكوين مسار واحد من المسارات المتوازية فى المرحلة الواحدة فاذا كانت قيمة التيار المرحلى الكلى لملفات المنتج هى I_a أمبير، وكان عدد المسارات المتوازية المطلوبة هو 2a لكى يتحدد التيار فى المسار الواحد بالقيمة I_c أمبير ، فان $I_c = \frac{I_a}{2a}$. ويكون هذا هو التيار المار

فى موصلات المنتج ، وهو ماتتحمله هذه الموصلات بدون تسخين زائدفى الآلة.

وإذا كان عدد الموصلات الكلية فى مجارى المنتج هو $z = 6pqu$ ، فمن الواضح أن عدد اللفات T'_{ph} الذى يدخل فى حساب قيمة القوة الدافعة الكهربية المرحلية للآلة يصبح :

$$T'_{ph} = \frac{T_{ph}}{2a} = \frac{z}{6 \times 2a} = \frac{pqu}{2a} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (\text{٤—١})$$

ويلاحظ أن الشرط الأساسى لتكوين المسارات المتوازية أن تكون القوى الدافعة الكهربية المتولدة فى المسارات المتوازية للمرحلة الواحدة متساوية تماما، عدديا ومرحليا . وهذا يعنى أننا لانستطيع تكوين هذه المسارات إلاإذا أمكن تقسيم الملفات فى المرحلة الواحدة إلى مجموعات من الملفات،بحيث تعطى المجموعة قوة دافعة كهربية ، تساوى القوة الدافعة الكهربية التى تعطيها كل مجموعة من

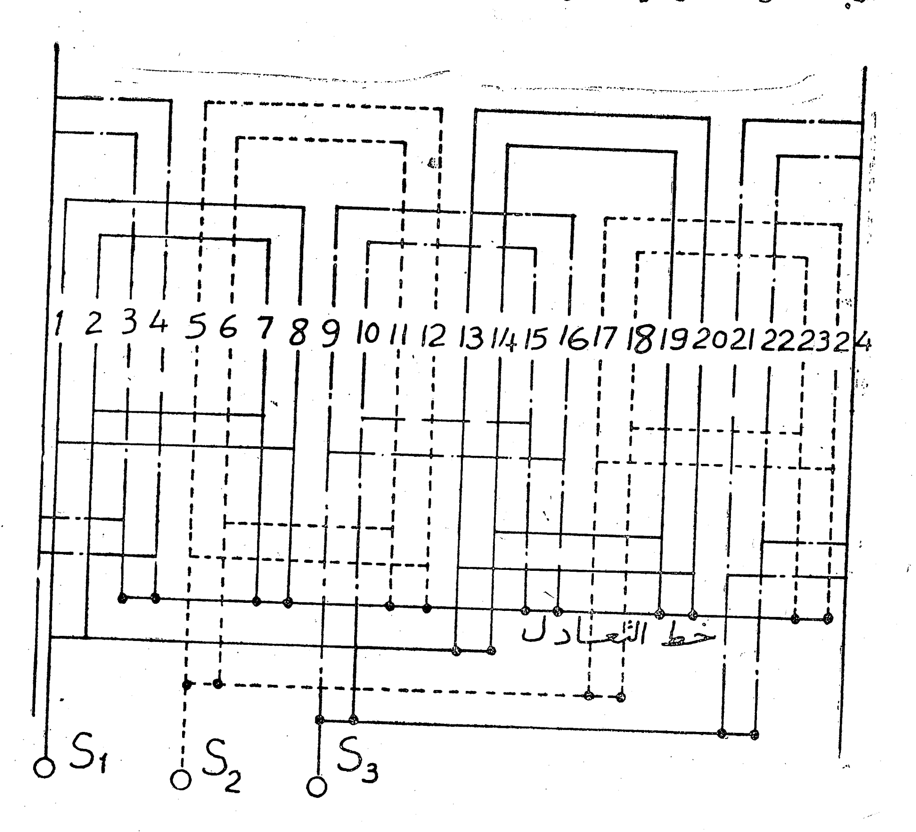


شكل (١٦ — ١أ)

المجموعات الأخرى من ناحية القيمة العددية ، وتنطبق معها مرحليا تمام الانطباق .

ويمكن التوصل إلى ذلك باستخدام مخطط نجمة المجارى ، كما هو مبين فى شكلى (١٦ — ١ أ ، ب) اللذين يوضحان الحل المناسب للمثال السابق ، إذا أردنا تكوين أربعة مسارات متوازية فى كل مرحلة أى أن $2a = 4$.

بمراجعة مخطط نجمة المجارى فى شكل (١٦ — ١ أ) يتضح لنا أنه يمكن تكوين أربعة مسارات متوازية فى كل مرحلة على النحو التالى :



شكل (١٦ — ١ ب)

المرحلة الأولى : المسار الأول — عبارة عن الملف (8 — 1) — المسار

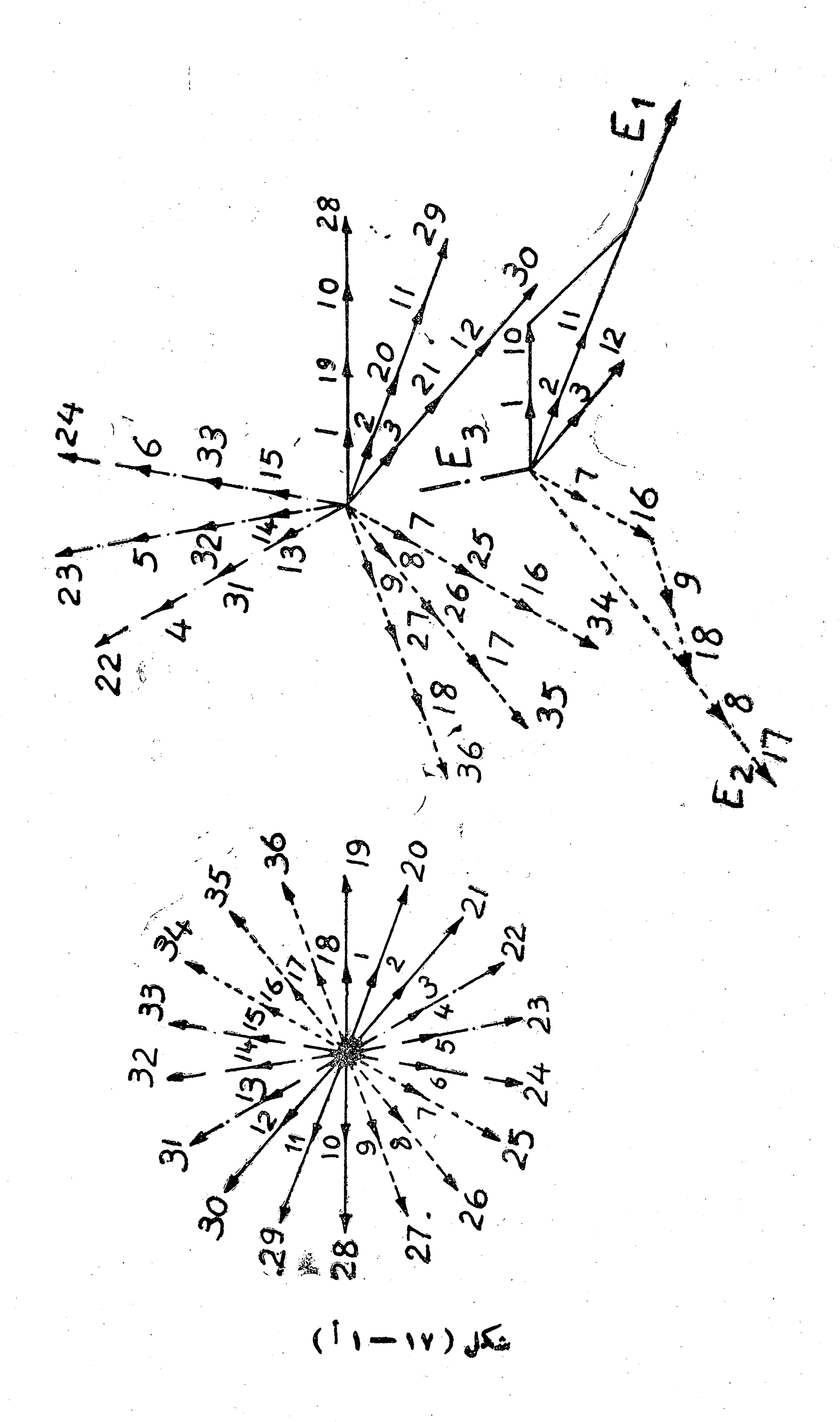
الثانى الملف (7 — 2) — المسار الثالث الملف (20 — 13) — المسار الرابع الملف (19 — 14) .

المرحلة الثانية : المسار الأول عبارة عن الملف (12 — 5) — المسار الثانى الملف (11 — 6) — المسار الثالث الملف (24 — 17) — المسار الرابع الملف (23 — 18) .

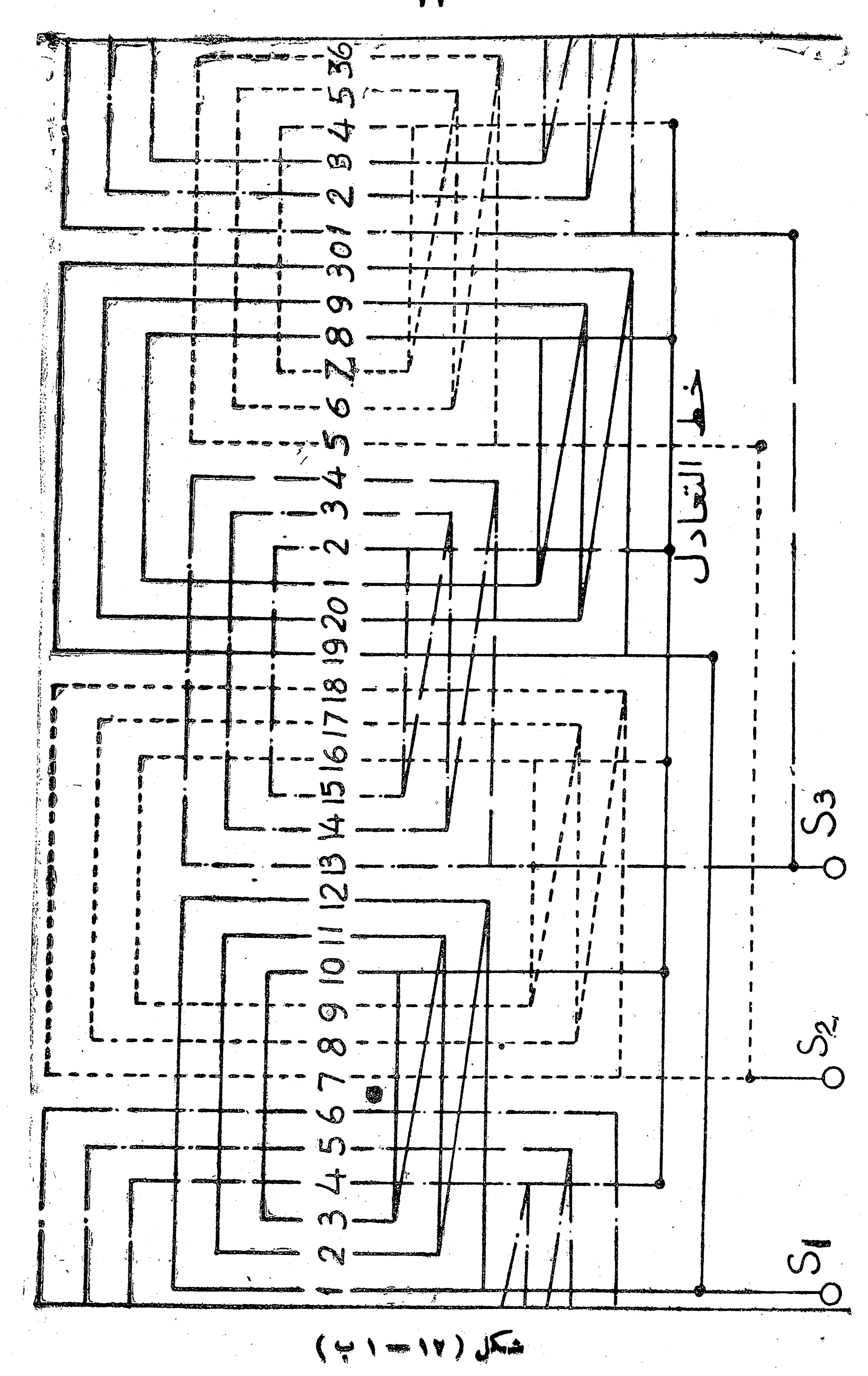
المرحلة الثالثة : المسار الأول عبارة عن الملف (16 — 9) — المسار الثانى الملف (15 — 10) — المسار الثالث الملف (4 — 21) — المسار الرابع الملف (3 — 22) ،

ويتضح من شكل (١٦ — ١ أ) أيضا أن القوة الدافعة الكهربية التى يعطيها المسار تساوى القوة الدافعة الكهربية التى يعطيها كل من المسارات الأخرى فى نفس المجموعة وتنطبق معها مرحليا ، لذلك فاننا نحصل على القوة الدافعة الكهربيه المرحلية بتحديد القوة الدافعة الكهربية التى يعطيها أحد المسارات فى المرحلة .

إذا كانت $q = 3$ بدلا من $q = 2$ مع نفس عدد الأقطاب ، بمعنى أن عدد المجارى الكلى أصبح 36 بدلا من 24 ، نجد بمراجعة مخطط نجمة المجارى أننا لا نستطيع تكوين أربعة مسارات متوازيه فى كل مرحلة فى الآلة ، ولكن يمكن فى هذه الحالة تكوين مسارين متوازيين فقط فى كل مرحلة ، كما يتضح من شكلى (١٧ — ١ أ ، ب) . ويلاحظ أن الآله فى هذه الحالة تنقسم إلى آلتين متماثلتين تماما ، كل منهما ذات قطبين وتحتوى على 18 مجرى ، كما تمثل المرحلة الواحدة فى كل من هاتين الآلتين مساراً من المسارين المتوازيين فى المرحلة المناظرة فى الآلة الأصلية .



شكل (١٧ — ١ أ)

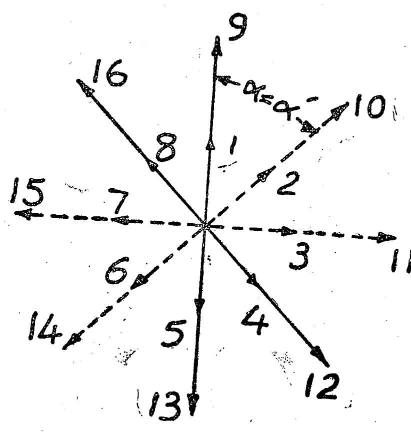


1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 1 2 3 4 5 6 7 8 9 30 1 2 3 4 5 36
S_1
S_2
S_3
خط التعادل

شكل (١٢ — ١ ب)

الملفات ثنائية المراحل (Two phase windings) :

فى المولدات ثنائية المراحل (Two phase generators) توجد مرحلتان فقط . لذلك تقسم مجارى المنتج على أساس وجود مرحلتين من الملفات فقط ، يفصل بينهما 90 درجة كهربية ، أى أنهما متعامدتان . فاذا كانت $q = 2$ فى هذه الحالة أيضا ، فمعنى هذا أن عدد المجارى الكلى على سطح المنتج يصبح $S = 2p \times 2q$ أى $4pq$ وهو يساوى 16 إذا كان عدد الأقطاب أربعة . فاذا كان اللف أحادى الطبقة ، فان هذا يعنى وجود 16 جانب من جوانب الملفات يخص كل مرحلة منها ثمانية ، أى أن عدد الملفات فى المرحلة هو أربعة .

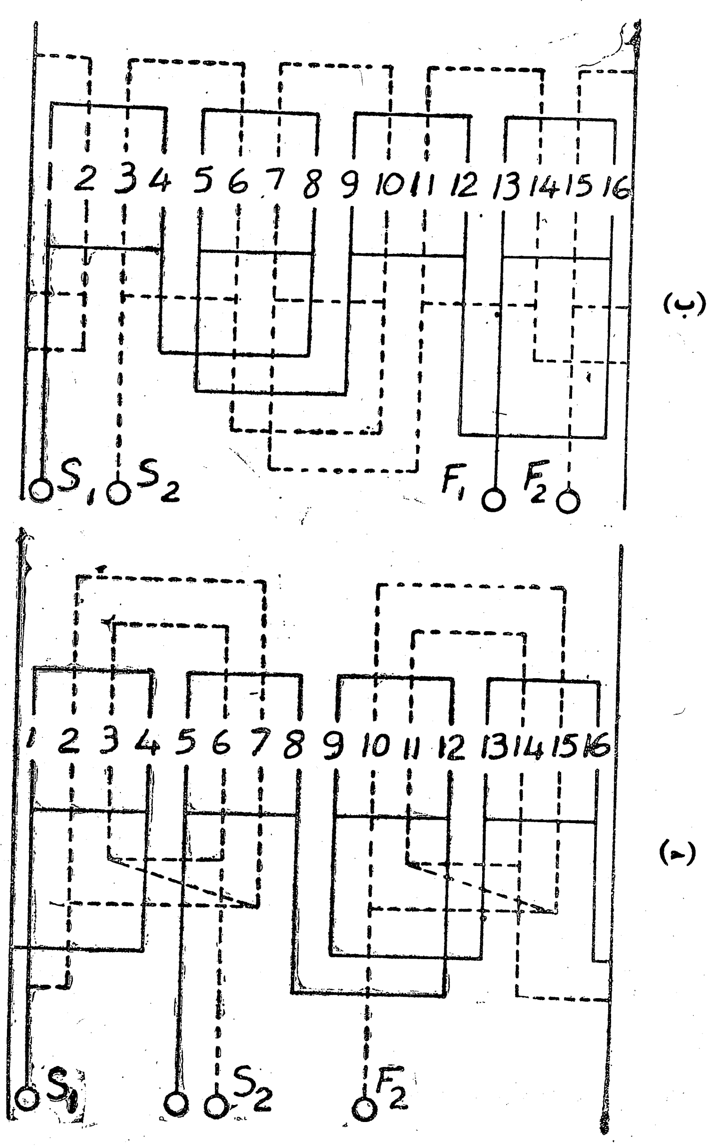


شكل (١٨ — ١ أ)

ونستعين عند تنفيذ اللف فى هذه الحالة أيضا بمخطط نجمة المجارى الذى نرسمه باتباع نفس الخطوات التى اتبعناها فى حالة الملفات ثلاثية المراحل ، وذلك على النحو التالى : حيث أن $q = 2$ فان هذا يعنى وجود مجريين لكل مرحلة تحت كل قطب ، وتمثل القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى جانب الملف فى المجرى بمتجه فى مخطط نجمة المجارى. وتكون قيمة كل من α' و α فى هذه الحالة عبارة عن :

$$\alpha' = \frac{360\ F}{S} = \frac{360 \times 2}{16} = 45°$$

$$\alpha = \frac{360\ p}{S} = \frac{360 \times 2}{16} = 45°$$



شکل (۱۸ — ۱ ب، ج)

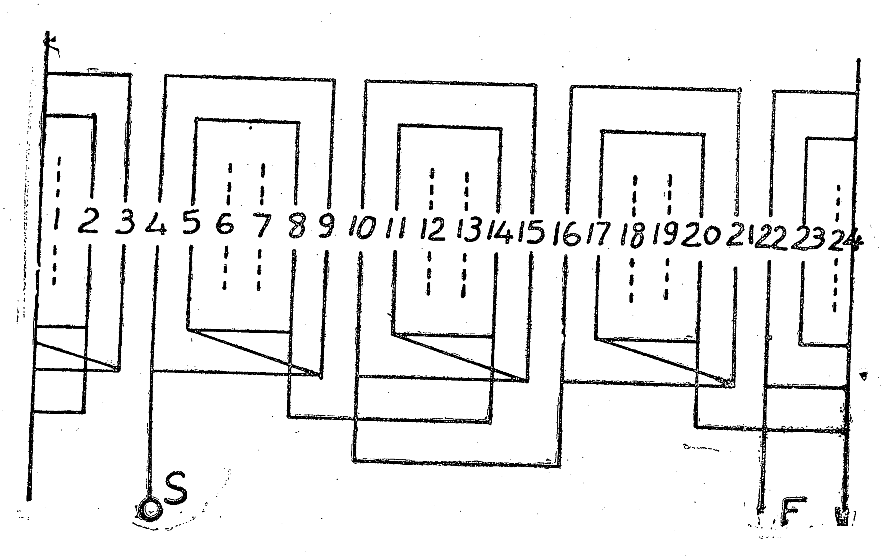
يبين شكل (١٨ — ١ أ) مخطط نجمة المجارى وشكل (١٨ — ١ ب) الملفات بعد توصيلها، بالإستعانة بمخطط نجمة المجارى، بحيث يتكون كل ملف من جانبين، تختلف القوة الدافعة الكهربية المتوالدة فيهما مرحليا بزاوية أقرب ما يمكن إلى 180 درجة. هذا وتكون المتجهات الممثلة لجوانب الملفات فى إحدى المرحلتين متعامدة على المتجهات المناظرة الممثلة لجوانب الملفات فى المرحلة الأخرى. كما يفصل بين بدايتى المرحلتين زاوية مرحلية مقدارها 90 درجة كهربية. يبين شكل (١٨ — ١ حـ) توصيل الملفات بالطريقة التى تسمح باستخدام منتج منقسم إلى جزءين، حتى يمكن تجميعه عند مكان التشغيل، مع استخدام ملفات جاهزة.

الملفات احادية المراحل (Single phase winding) :

عند تصميم الملفات الخاصة بمولدات التيار المتردد (أو المحركات) أحادية المراحل يراعى عدم توزيع الملفات على جميع مجارى المنتج، بحيث تملأ الموصلات ثلثى هذه المجارى فقط. فقد وجد، كما سوف يوضح بالبرهان فيما بعد، أن الزيادة المكتسبة فى قيمة القوة الدافعة الكهربية للآلة نتيجة لملء ثلث المجارى الباقى بالموصلات، لا توازى ثمن النحاس والمجهود الذى يبذل فى اعداد هذه الموصلات. لذلك جرت العادة على ترك ثلث عدد المجارى خاليا فى مثل هذه المولدات.

نستخدم عند عمل التوصيلات الخاصة بالملفات فى مولد التيار المتردد أحادى المراحل مخطط نجمة المجارى، مرسوما على أساس أن المولد ثلاثى المراحل فى البداية. ثم نختار ثلثى المتجهات بشرط أن يكون كل ثلث منها مجموعة، يكون كل متجه فيها مختلفا عن متجه مناظر فى المجموعة الأخرى بزاوية مرحلية أقرب ما تكون إلى 180°، وذلك حتى يمكن تكوين ملف من مثل هذين المتجهين

وعند توصيل الملفات على التوالى بعد ذلك معا يراعى ، كما فعلنا فى جميع الحالات السابقة ، أن يكون اتجاها القوة الدافعة الكهربية فى جانبى الملفين الموصلين معا متضادين . فاذا أردنا لف منتج المولد ذى الأربعة وعشرين مجرى السابق ، بملفات أحادية المراحل ، يمكننا الاستعانة بمخطط نجمة المجارى الوارد فى شكل (٣ — ١ ب) الخاص بالآلة عندما أردنا لفها بملفات ثلاثيه المراحل . ثم نختار مجموعتين من المتجات تحتوى كل منها على ثلث عدد المتجهات ، أى ثمانية ، ويكون كل متجه فى المجموعة الأولى على زاوية أقرب ماتكون إلى 180° من أحد المتجهات فى المجموعة الثانية . فاذا كانت المجموعة الأولى تحتوى على المتجهات 17 , 16 , 15 , 14 , 5 , 4 , 3 , 2 نجد أن المجموعة الثانية تحتوى على المتجهات 23 , 22 , 21 , 20 , 11 , 10 , 9 , 8 ، وهذا يعنى أننا سوف نترك المجارى 24 , 19 , 18 , 13 , 12 , 7 , 6 , 1 خالية بدون ملفات .



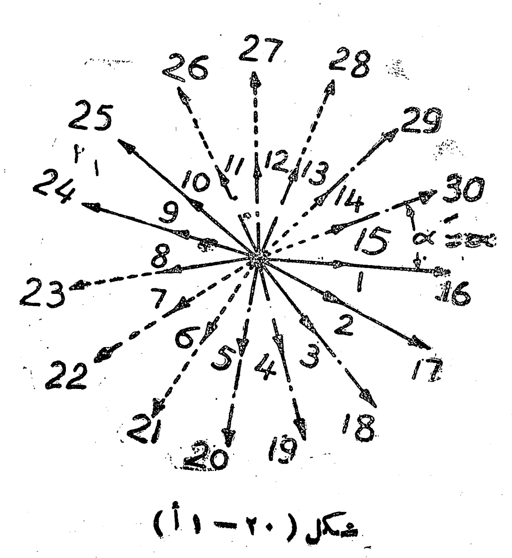
شكل (١٩ — ١)

يبين شكل (١٩ — ١) كيفية توصيل الملفات على أساس اتباع القواعد السابقة

الملفات كسرية المجرى (Fractional slot windings) :

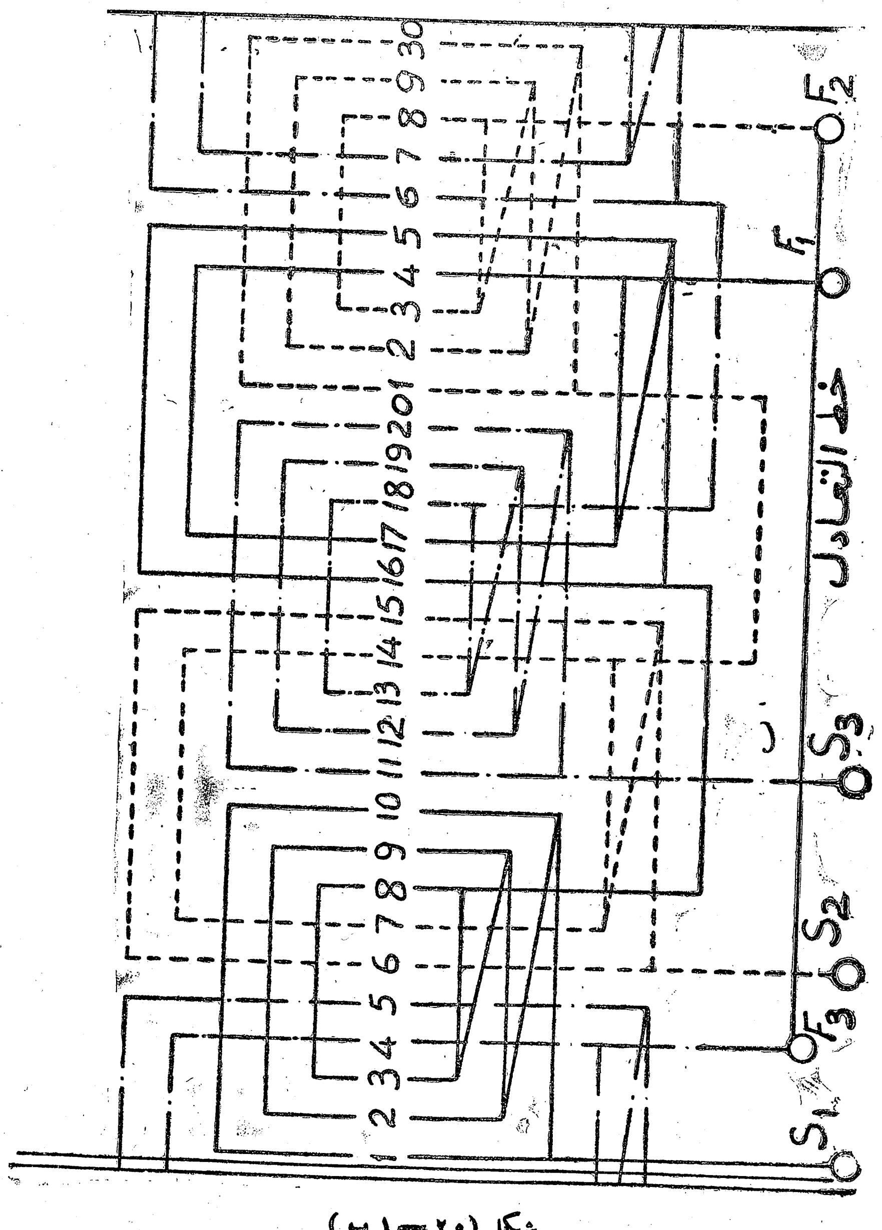
عندما تكون قيمة q فى الآلة كسراً أو عدداً كسرياً يقال إن الملفات كسرية المجرى . ولا تختلف طريقة تنفيذ الملفات فى هذه الحالة عن الطرق التى اتبعناها فى الأحوال السابقة ، غاية ما فى الأمر أنه يجب توافر شرطان أساسيان حتى يمكن تنفيذ اللف على النحو الصحيح :

١ — يجب أن يكون عدد أزواج الأقطاب p مساويا أو مكرراً صحيحاً لمقام الكسر فى q . فاذا كانت $q = 2\frac{1}{2}$ ، فان p يجب أن تساوى 2 أو أحد مضاعفاتها ، وإذاكانت $q = 1\frac{1}{4}$ ، فان p يجب أن تساوى 4 أوأحدمضاعفاتها ، وهكذا . يبين شكل (٢٠ — ١ب) طريقة عمل التوصيلات فى ملفات آلة تحتوى على 30 مجرى وعدد أقطابها 4 أىأن $q = 2\frac{1}{2}$ ، ويلاحظ فىهذه الحالة أن عدد الملفات يختلف فى مجموعات الملفات من اثنين إلى ثلاثة،نتيجة لتغير عدد المجارى الخاصة بالمرحلة من اثنين تحت أحد الأقطاب إلى ثلاثة تحت القطب الآخر،حتى تصبح $q = 2\frac{1}{2}$ فى المتوسط . كما يلاحظ ترتيب الأعداد المختلفة للمجارى تحت



شكل (٢٠ — ١ أ)

الأقطاب المتجاورة ، بحيث يمكن تكوين مجموعات الملفات بعدد من الجوانب المتساوية . ومن هنا تظهر أهمية الشرط المفروض . هذا وقد تم عمل التوصيلات



شكل (٢٠ — ١ ب)

المبينة فى الشكل بمساعدة مخطط نجمة المجارى المبين فى شكل (٢٠ — ١ أ) ، باستخدام نفس القواعد السابق شرحها ، حيث نجد أن $\alpha' = \alpha = 24°$ فى هذه الحالة .

٢ — من الواضح أنه يجب أن تبدأ المراحل التاليه فى مجارى يفصل بينها زاوية مقدارها $\frac{360}{m}$ درجة كهربية ، حيث m هى عدد المراحل (نعتبر فى حالة الملفات ثنائية المراحل أن $m = 4$ لأن الزاوية بين المرحلتين $90°$ كهربية)، ونظراً لأن α' هى الزاوية بين كل مجريين متتاليين فان $\frac{360}{m}$ يجب أن تكون مكرراً صحيحاً للزاوية α' . فاذا كانت g عدداً صحيحاً موجباً نجد أن :

$$g\,\alpha' = \frac{360}{m} = g\,\frac{360\,F}{S}$$

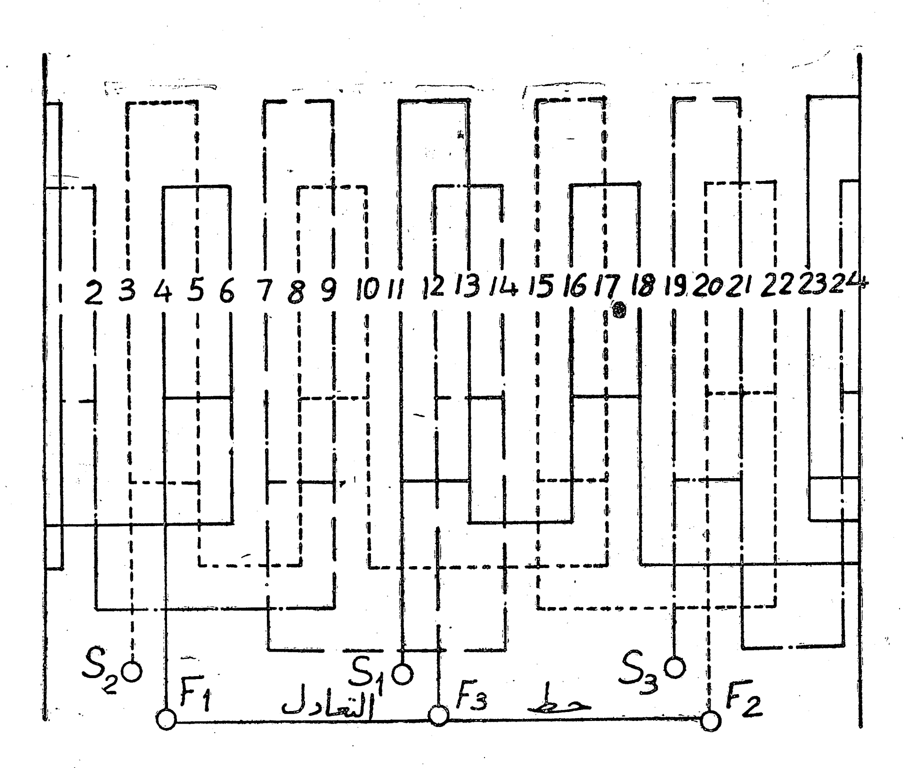
$$\therefore \quad \frac{S}{F m} = g = \text{عدد صحيح موجب}$$

هذا هو الشرط الثانى الواجب توافره . وفى المثال المعطى فى 1 نجد أن $g = 5$.

مثال آخر للملفات كسرية المجرى هو ذلك الذى ورد فى أول الباب ، والمبين مخطط نجمة المجارى له فى شكل (٢ — ١ أ) ، حيث وجدنا أن $q = \frac{4}{5}$ وأن $\alpha' = 15°$. بالإستعانة بمخطط نجمة المجارى هذا ، وتطبيق القواعد الخاصة بالملفات كسرية المجرى ، يمكن تنفيذ اللف على النمط المبين فى شكل(٢٠ — ١ ح) وفى هذه الحالة نجد أن قيمة g تصبح :

$$g = \frac{24}{1 \times 3} = 8$$

ومعنى هذا أن عدد المجارى التى تفصل بين بدايات المراحل يساوى 8 أيضاً



شكل (٢٠ — ١ ﺣ)

ثانيا — الملفات مزدوجة الطبقة (Double layer Windings) :

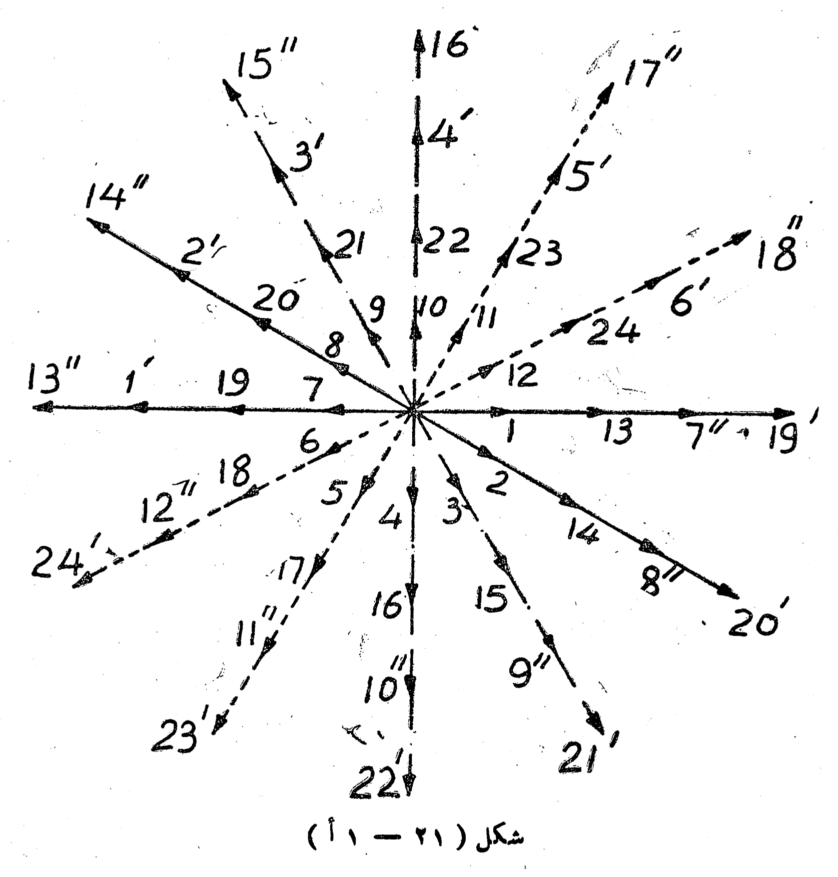
يحتوى المجرى فى هذا النوع من الملفات على طبقتين معزولتين عن بعضهما البعض عزلا تاما . ويوجد فى كل طبقة جانب واحد من جوانب الملفات ، وهذا هو مايميز هذا النوع من ملفات منتج آلات التيار المتردد عن ملفات منتج آلات التيار المستمر ، التى يمكن أن تحتوى الطبقة الواحدة فى المجرى فيها أكثر من جانب واحد من جوانب الملفات . لذلك نجد أن عدد الملفات فى هذه الحالة يساوى عدد المجارى . وعدد جوانب الملفات ضعف هذا العدد الأخير . ويراعى كما هو الحال فى آلات التيار المستمر أن يشغل أحد جانبى الملف الواحد الطبقة

العلوية (upper layer) فى مجرى — (ناحية الثغرة الهوائية) بينما يشغل جانبه الآخر الطبقة السفلى (bottom layer) فى مجرى آخر (ناحية القلب الحديدى) . وتتحدد المسافة بين الجانبين على سطح المنتج باتساع الملف (coil span) ، أوخطوة اللف (Winding pitch) ، وذلك بما تساويه هذه المسافةمقاسة بعدد المجارى التى تشملها . وهى تساوى خطوة قطبيةفى حالة الملفات كاملة الخطوة ، وأقل أو أكثرقليلا من الخطوة القطبية فى حالة الملفات كسرية الخطوة تماما كما حدث مع الملفات أحادية الطبقة . ويمكن أن يخص كل مرحلة عدداًصحيحا من المجارى تحت كل قطب ، كما يمكن أن يكون هذا العدد كسريا ، فنحصل على ملفات كسرية المجرى ، كما كان الأمر بالنسبة الملفات أحادية الطبقة .

عند عمل التوصيلات الخاصة بالملفات نستعين بمخطط نجمة جوانب الملفات (coil sides star diagram) الذى يرسم على نمط مخطط نجمة المجارى السابق شرحه فى حالة الملفات أحادية الطبقة ، وذلك على النحو التالى :

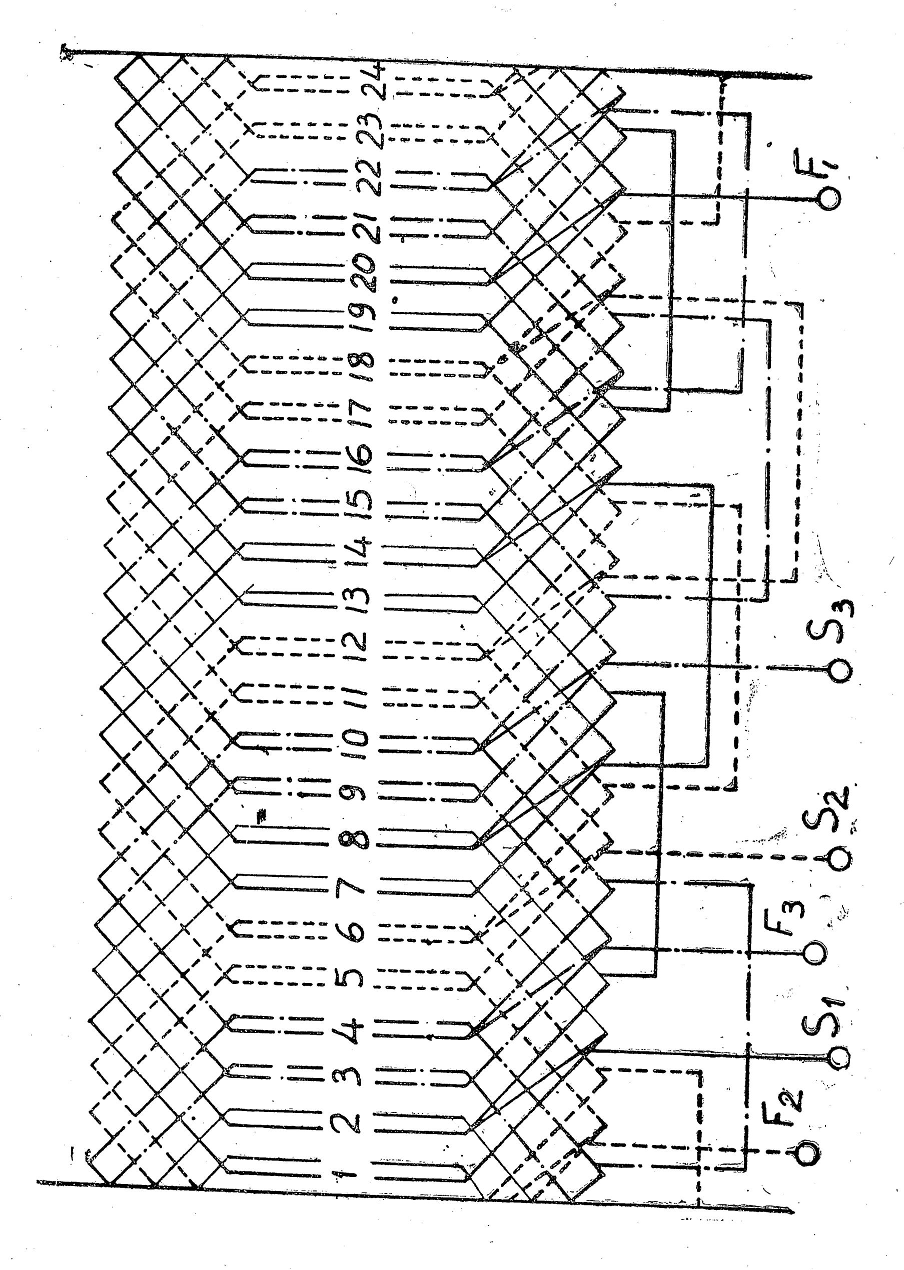
بالنسبة لجوانب الملفات التى تشغل الطبقات العلوية فى المجرى يرسم المخطط بنفس الطريقة التى اتبعناها فى رسم مخطط نجمة المجارى تماما . غاية ما فى الامر أن الارقام المعطاه للمتجهات سوف تدل فىهذه الحالة على هذه الجوانب للملفات أساساً ، بالإضافة إلى أن كل رقم سوف يعطى أيضا رقم المجرى الذى يحتل جانب الملف الطبقة العليا فيه . ترسم المتجهات الخاصة بجوانب الملفات التى تشغل الطبقات السفلية فى المجارى بنفس الطريقة على نفس المخطط ، إبتداء من نهايات المتجهات السابقة ، مع تحديد الجانب السفلى للملف الاول بناء على قيمة اتساع الملف بالمجارى ، وإعطائه الرقم '1 . تعطى الجوانب السفلية للملفات نفس الأرقام التى أعطيت للجوانب العلوية ، مع تمييزها بشرطة أو شرطتين أو ثلاث ... ألخ ، على

العدد . ويكون التمييز بشرطة واحدة ، أو أثنتين أو ثلاثة ... ألخ ، على حسب ما إذا كان المتجه الخاص بالجانب العلوى الملف الواقع فى نفس المجرى قد جاء فى الدورة الأولى ، أو الثانية أو الثالثة ... ألخ ، فى بداية الرسم .



شكل (٢١ — ١ أ)

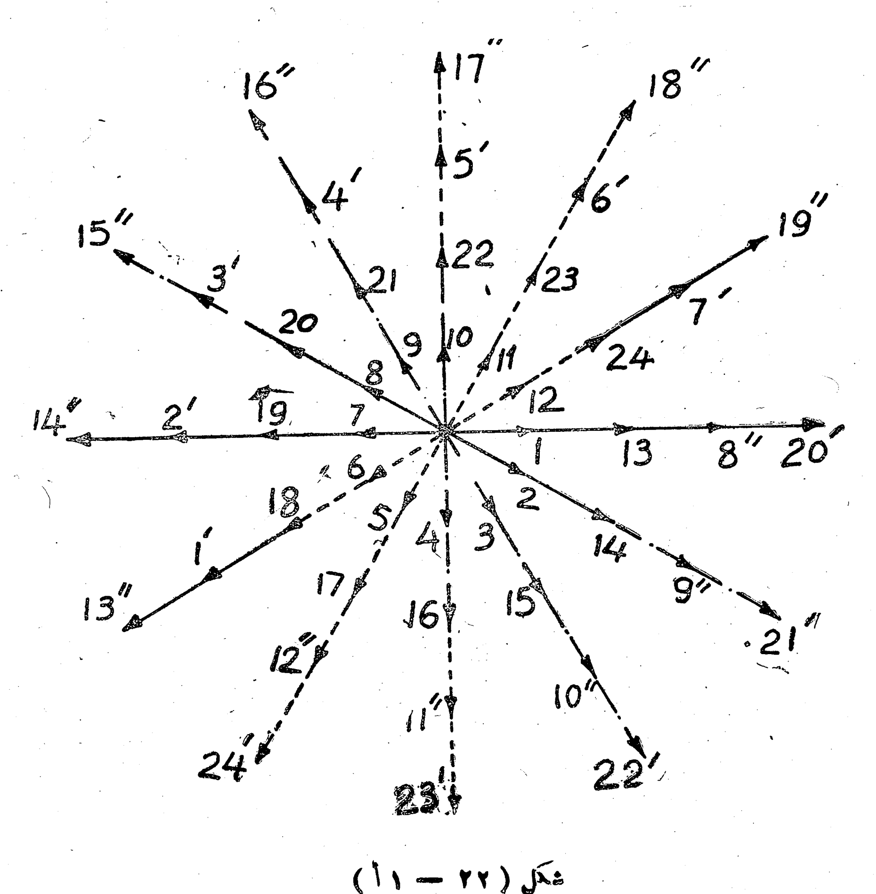
عند توصيل مجموعات الملفات معاً تتبع نفس القاعدة السابق ذكرها من حيث أن عمل التوصيل يجب أن يكون دائماً بين جانبى ملفان يولدان قوتين دافعتين كهربيتين متضادتين فى الاتجاه ، كما أن تحديد بدايات المراحل يكون بنفس الأسلوب وباتباع نفس القواعد المعطاة سابقا . كما يجب فى هذه الحالة أيضا مراعاة الشروط الخاصة بامكان تنفيذ اللف عند عمل ملفات كسرية المجرى،


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
F_1
S_3
S_2
F_3
S_1
F_2

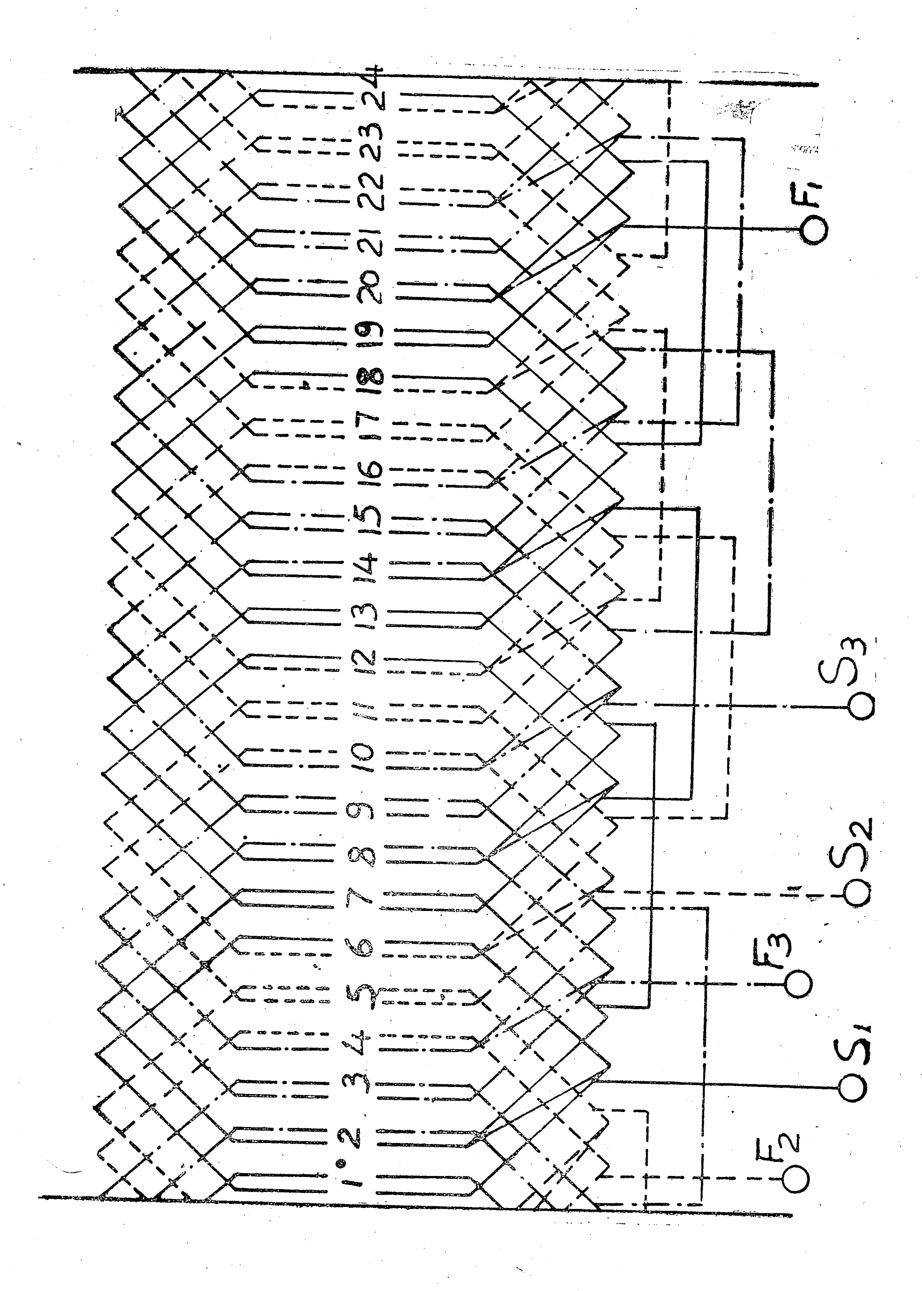
شكل (٢١ — ١ ب)

مع فارق واحد ، وهو أن اتساع الملف فى حالة الملفات أحادية الطبقة يتحدد تلقائياً على أساس توافر الشروط المطلوبة ، بينما يمكن بعد توافر هذه الشروط فى حالة الملفات ثنائية الطبقة اختيار اتساع الملف كما نريد .

يبين شكل (٢١ — ١ أ) مخطط جوانب الملفات وشكل (٢١ — ١ ب) طريقة تنفيذ هذه الملفات فى آلة تيار متردد ذات أربعة أقطاب ، ويحتوى منتجها على 24 مجرى ، وذلك عندما يكون الملف مزدوج الطبقة ، ويكون اتساع الملف خطوة قطبية كاملة ، بينما يبين شكلا (٢٢ — ١ أ ، ب) حل نفس المسألة عندما يكون



شكل (٢٢ — ١ أ)


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
F1
F2
F3
S1
S2
S3

شكل (٢٢ — ١ ب)

اتساع الملف خمسة أسداس الخطوط القطبية . وفى كلا الحالتين نجد أن :

$$\alpha = \alpha' = \frac{360\ F}{S} = 30^\circ \text{ درجة كهربية}$$

نبدأ بعد ذلك فى رسم مخطط جوانب الملفات لكل حالة للاستعانة به بعد ذلك فى عمل التوصيلات المختلفة للملفات . ويكون رسم مخطط جوانب الملفات العلوية فى الحالتين على نمط مخطط نجمة المجارى فى الأمثلة السابقة ، حيث نحصل على دورتين من المتجهات (يكون عدد دورات المتجهات مساويا F حيث يقع فى كل دورة $\frac{S}{F}$ من المتجهات ، التى يفصل بين كل اثنين متتاليين منها الزاوية α') . نعطى دورة المتجهات الأولى الأرقام من 1 إلى 12 وتعطى الدورة الثانية الأرقام من 13 إلى 24 . وتشير هذه الأرقام إلى ترتيب المجارى جنبا إلى جنب ، كما أنها تدل فى الوقت نفسه على أرقام جوانب الملفات التى تحتل الطبقة العلوية لهذه المجارى ، كما سبق شرحه .

عند رسم المتجهات الخاصه بالقوى الدافعة الكهربية ، التى تتولد فى الجوانب السفلية للملفات ، يجب أولا تحديد اتساع الملف بعدد المجارى التى يحتوى عليها ، وهو ستة فى الحالة الأولى وخمسة فى الحالة الثانية . معنى هذا أن الجانب السفلى للملف الأول يقع فى المجرى رقم 7 بالنسبة للحالة الأولى وفى المجرى رقم 6 بالنسبة للحالة الثانية . وبناء على ذلك نرسم المتجه $1'$ ، الخاص بالجانب السفلى للملف رقم 1 فى مخطط متجهات جوانب الملفات ، على امتداد المتجه رقم 7 فى الحالة الأولى ، وعلى إمتداد المتجه رقم 6 فى الحالة الثانية . يلى ذلك المتجهات $2'$, $3'$, $4'$ ... ألخ على زوايا α من بعضها البعض . عندما نصل إلى المتجه الخاص بالجانب السفلى للملف رقم 7 فى الحالة الأولى ، والخاص بالجانب السفلى للملف رقم 8 فى الحالة الثانية ، نجد أننا وصلنا إلى المجرى رقم 13 ، وهو واقع

فى الدورة الثانية ، بالنسبة للمتجهات الخاصة بجوانب الملفات العلوية السابق رسمها . لذلك تميز هذه الأرقام بوضع شرطتين فوقها بدلا من شرطة واحدة ، كما سبقت الإشارة اليه ، فتصبح ″7 فى الحالة الأولى ، ″8 فى الحالة الثانية . ونستمر على هذا المنوال .

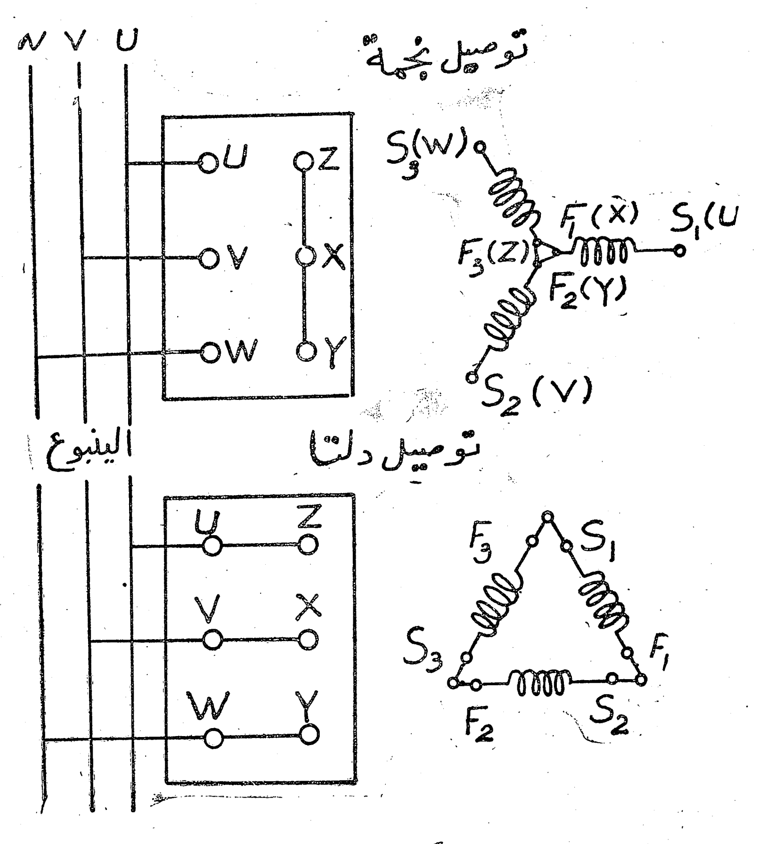
الاستخدامات المختلفة لانواع الملفات :

يؤدى استخدام الملفات كسرية المجرى فى الآلات المتزامنة إلى تحسين شكل منحنى الضغط ، بما يعنى اقترابه من الشكل الجيبى المطلوب فى هذه الحالة ، وذلك عندما يكون شكل منحنى كثافة الخطوط المغناطيسية أقرب ما يكون إلى الشكل الجيبى . كما ينتج عن تقصير إتساع الملف بنسبة معينة إلى حذف توافقيات من منحنى الضغط تتوقف درجتها على قيمة هذه النسبة . ونظراً لأنه يمكن التوفيق بين هذين الامرين معاً فى حاله الملفات ثنائية الطبقة ، فان الغالب هو استعمال هذا النوع من الملفات فى الآلات المتزامنه ، للحصول على منحنى ضغط أقرب مايكون إلى الشكل الجيبى . أما فى حالة الملفات أحادية الطبقة فان استخدام قيمة كسرية معينة لـ q' يؤدى إلى تحديد اتساع معين للملف ، بخطوة كسريه تختلف عن الخطوة القطبية اختلافا صغيرا ، أما فى حالة المحركات التأثيرية فلا يصح عادة إستخدام ملفات كسرية المجرى ، إذ ينشأ عنها بعض المتاعب فى التشغيل ، مثل إصدار الطنين ، أو تولد توافقيات فى منحنى عزم الدوران ، ينتج عنها تغيرات جوهرية فى سرعة دوران المحرك ، تجعلها تختلف اختلافا بينا عن السرعة المطلوبة . وقد تستخدم الملفات أحادية الطبقة ، كما تستخدم الملفات ثنائية الطبقة فى هذا النوع من الآلات ، دون تمييز بين الحالتين ، إلا على حسب ما تقتضيه ظروف التصميم .

وهناك نوع واحد من المحركات التأثيرية ، التى نضطر إلى إستخدام الملفات كسرية المجرى فيها . وهى المحركات ذات الملفات متعددة الأقطاب ، التى نحصل منها على سرعات تزامن مختلفة بتغيير توصيلات الملفات .

توصيل اطراف المراحل المختلفة الى صندوق النهايات (Terminal Box)

يحتوى صندوق النهايات فى الآلة على ستة أطراف ، تستخدم لتوصيل الآله إلى الينبوع الكهربائى ثلاثى المراحل ، لكى تغذيه بالقدرة الكهربية ، إذا كانت الآله مولداً ، أو تأخذ منه القدرة الكهربية ، إذا كانت الآله محركا .



شكل (٢٣ — ١)

يبين شكل (٢٣ — ١) كيفية ترتيب الأطراف الستة فى صندوق النهايات ، حتى يمكن توصيل الآلة عن طريقه على شكل دلتا أو نجمة، بحيث تراعى البساطة فى إجراء التوصيلات تفاديا لحدوث الأخطاء . هذا ويكون توصيل أطراف المراحل المختلفة المبينة فى الأشكال السابقة إلى الأطراف، فى صندوق النهايات، على النحو التالى :

بداية المرحلة الأولى S_1 توصل إلى U ونهايتها F_1 إلى X

بداية المرحلة الثانية S_2 توصل إلى V ونهايتها F_2 إلى Y

بداية المرحلة الثالثة S_3 توصل إلى W ونهايتها F_3 إلى Z

الباب الثانى

القوة الدافعة الكهربية المنتجة فى ملفات آلات التيار المتردد

(E.M.F. produced in alternating current machine windings)

مقدمة :

سوف نحتاج فى خلال دراستنا للأنواع المختلفة من آلات التيار المتردد ، سواء المتزامنة أو التأثيرية ، وما كان مولداً أو محركا منها ، إلى حساب قيمة القوة الدافعة الكهربية التى تتولد فى كل مرحلة نتيجة للحركة النسبية بين الملفات ومجال مغناطيسى معين ، ناشىء عن أقطاب مغناطيسية (حقيقية وملموسة ، كما هو الحال فى الآلات المتزامنة ، أو تصورية نتيجة لظواهر مغناطيسية مكافئة ومحسوبة ، كما هو الحال فى الآلات التأثيرية) عددها $2p$ وتدور بسرعة التزامن n_s ، حيث ترتبط هذه السرعة وعدد الأقطاب بتردد القوه الدافعة الكهربية المنتجة ، والتيارات المصاحبة لها ، بالعلاقة المعروفة $f = \frac{pn_s}{60}$ ذبذبة فى الثانية .

ونفترض مبدئيا دائما أن منحنى كثافة الخطوط المغناطيسية ، الناشىء عن توزيع خطوط المجال المغناطيسى لكل قطب على مدى الخطوة القطبية ، ذو شكل جيبى ، مما يجعلنا نحصل على قوة دافعة كهربية فى الموصلات المختلفة تتغير على منحنى جيبى مع الزمن ، وذلك بسبب الحركة النسبية بين هذه الموصلات والمجال المغناطيسى . وقد سبق شرح ذلك بالتفصيل فى البنود الخمسة من الباب الثالث فى كتاب هندسة الآلات الكهربية (المبادىء الأساسية وآلات التيار المستمر ص ١٣١ إلى ص ١٣٨) . والمهمة الملقاة على عاتقنا الآن ، هى كيف نستطيع حساب القوة الدافعة

الكهربية المرحلية للآلة ، بمعلومية القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى الموصـــل الواحد ، على هذا الأساس .

فاذا فرضنا أن e_c هى القيمة الفعالة (جذر متوسط المربع) للقوة الدافعـة الكهربية المتولدة فى كل موصل من موصلات المنتج ، عنـــدما يكون الفيض المغناطيسى فى كل قطب هو ϕ خط ، نجد أن :

$$e_c = 1.11 \times 2p\,\phi\, \frac{n_s}{60} \times 10^{-8}$$ فولت ... (١ — ٣)

حيث $2p\,\phi\, \frac{n_s}{60} \cdot 10^{-8}$ هى القيمة المتوسطة للقوة الدافعة الكهربيـة المتولدة فى الموصل (راجع هندسة الآلات التيـار المستمر ص ٣٤١ ، ٣٤٢) ، والرقم 1.11 هو نسبة القيمة الفعالة (أو جذر متوسط المربع) للقيمة المتوسطة فى حالة المنحنى الجيبى .

من الواضح أن القوى الدافعة الكهربية فى موصلات المرحلة الواحدة ليست فى توافق مرحلى معاً ، كما رأينا فى الباب السابق الخاص بالملفـــات . لذلك لا نستطيع الحصول على القوة الدافعة الكهربية المرحلية بضرب e_c فى عـــدد الموصلات التى تحتوى عليها المرحلة الواحـدة ، إلا إذا استخـدمنا عامل تصحيح معين، تتوقف قيمته على طريقة تنفيذ اللف فى الآلة ، ويطلق عليه اسم معامل اللف (Winding factor) ، ويرمز له بالرمز k_w عادة . فاذا فرضنا أن عـــدد اللفات فى المرحلة الواحدة هو T_{ph} يكون عدد الموصلات فيها $2T_{ph}$ ، وتصبح القيمة الفعالة للقوة الدافعة الكهربية للمرحلية E_{ph} هى :

$$E_{ph} = 2T_{ph} \times e_c \times k_w = 4.44\, \frac{p n_s}{60}\, \phi\, T_{ph}\, k_w \times 10^{-8}$$

$$= 4.44\, f\, \phi\, T_{ph}\, k_w \times 10^{-8}$$ فولت .... (٢ — ٣)

معامل اللف عندما تكون q عددا صحيحا :

يتبين مما سبق شرحه فى الباب الاول ،أن ملفات المرحلة الواحدة تتكون من عدد معين من مجموعات الملفات (مقداره p فى الملفات أحادية الطبقة المتمركزة، و 2p فى الملفات المتمركزة المشطورة،والملفات مزدوجة الطبقة)، التى توصل معاً على التوالى . وتحتل الجوانب المتناظرة فى المجموعة الواحدة عدداً من المجارى المتجاوره تحت كل قطب يساوى q ، التى تنتشر على مدى ثلث الخطوة القطبية تحت هذا القطب ، أو ما يساوى 60 درجة كهربية . لذلك يطلق على مثل هذه الملفات بأنها ذات انتشار مرحلى(phase spread) يساوى ثلث الخطوةالقطبية أو $\frac{\pi}{3}$. وقياسا على ذلك فان الملفات ثنـــائية المراحل تكون ذات انتشار مرحلى مقــداره $\frac{\pi}{2}$. وبمراجعة الأشكال الخاصة ببيان توصيلات الملفات فى الباب السابق ، يتضح لنا أنه عندما تكون q عددا صحيحـا،فان كل مجموعة من مجموعات الملفات فى المرحلة الواحدة تحتل دائما مكانا مماثلا للأماكن التى تحتلهـا بقية المجموعـات بالنسبة للأقطاب المغناطيسية . وهـذا يعنى أن محصلة القوى الدافعة الكهربية فى موصلات المجموعة الواحدة تساوى فى القيمة ،وتتفق مرحلياً، مع محصلة القوى الدافعة الكهربية فى موصلات المجموعات الأخرى ، فى المرحلة الواحدة . لذلك يمكننا الحصول على القوة الدافعة الكهربية المرحلية بضرب قيمة محصلة القوى الدافعة الكهربية لموصلات المجموعة الواحدة فى عدد المجموعات فى المرحلة الواحدة وتكون قيمة المعامل k_w ، وهو معامل اللف ، فى هذه الحالة، عبارة عن النسبة بين قيمة محصلة القوى الدافعة الكهربية الفعلية لموصلات المجموعة الواحدة ، عند جمعها اتجاهيا ، ومجموع نفس هذه القوى عدديا ، باعتبارها فى توافق مرحلى معا . لذلك فانه عند حساب هذا المعامل يجب التفرقه بين الملفات

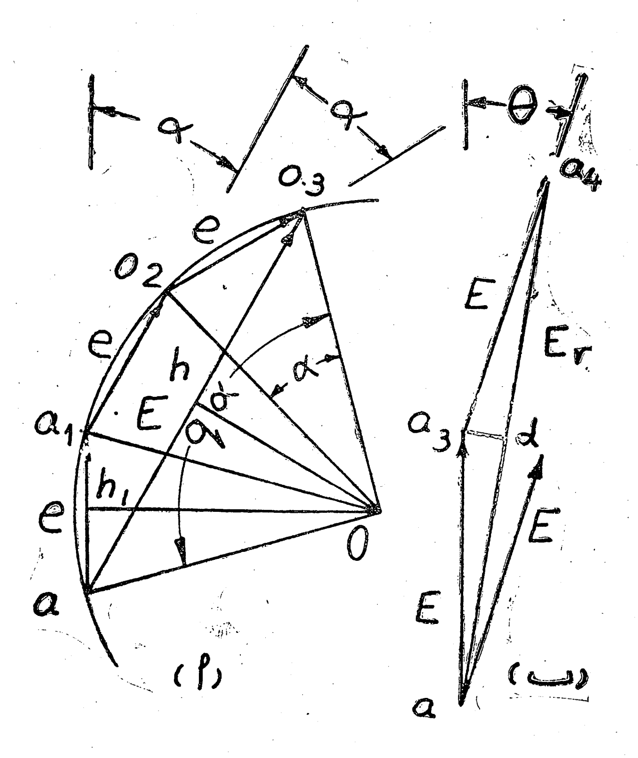
كاملة الخطوة والملفات كسرية الخطوة .

أولا : بالنسبة للملفات أحادية ، أو مزدوجة الطبقة ، كاملة الخطوة ، حيث يكون اتساع الملف مساويا خطوة قطبية كاملة ، تكون محصلة القوى الدافعة الكهربية ، المتولدة فى جوانب الملفات المتجاورة تحت أحد الأقطاب ، فى المجموعة الواحدة من الملفات ، فى اختلاف مرحلى مقداره 180 درجة كهربية بالضبط مع محصلة القوى الدافعة الكهربية المتولدة فى جوانب الملفات المتجاورة الأخرى ، لنفس مجموعة الملفات ، تحت القطب التالى المخالف . لذلك نحصل على قيمة k_w فى هذه الحالة بحساب النسبة بين قيمة محصلة القوى الدافعه الكهربيه الفعليه ، المتولدة فى جوانب الملفات المتجاورة تحت أحد الأقطاب ، ومجموع نفس هذه القوى عدديا ، باعتبارها فى توافق مرحلى معا . ويمكن الحصول على هذه النسبه برسم عدد q من المتجهات المتساويه ، كما هو مبين فى شكل (١ — ٢) ، التى تختلف مرحليا عن بعضها البعض بالزاويه α ، ثم جمعها إتجاهيا . فاذا كان طول المتجه الواحد e وطول المتجه المحصل E نجد بالرجوع إلى شكل (١ — ٢ أ) أن :

$$k_w = \frac{E}{q\,e} = \frac{a\,a_3}{q \times aa_1} = \frac{2\,ab}{2q \times ah_1} = k_d$$

$$k_d = \frac{Oa \sin\frac{q\alpha}{2}}{q \times Oa \sin\frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin\frac{q\alpha}{2}}{q \sin\frac{\alpha}{2}} \quad \cdots\cdots \quad (٢-٣)$$

ثانيا : بالنسبه للملفات مزدوجه الطبقه كسرية الخطوة ، حيث يكون اتساع الملف y مقدراً بالمجارى أقل (أو أكبر) من الخطوة القطبيه مقدرة بالمجارى 3q



شكل (١ — ٢)

تكون محصلة القوى الدافعة الكهربية E ، المتولدة فى جوانب الملفات التى عددها q تحت أحد الأقطاب فى المجموعة الواحدة من الملفات ، فى اختلاف مزحلى أقل من 180 درجة كهربية بالزاوية θ مع محصلة القوى الدافعة الكهربية E ، المتولدة فى جوانب الملفات المتجاورة الأخرى لنفس مجموعة الملفات تحت القطب التالى المخالف ، حيث يطلق على النسبة بين (3 q — y) ، 3 q اسم نسبة التقصير فى الخطوة القطبية ، ويكون .

$$\theta = \frac{3q - y}{3q} \times 180 \text{ درجة كهربية} \qquad (٤ — ٢)$$

وفى هذه الحالة نجد أن القوة الدافعة الكهربية الكلية التى نحصل عليها من جميع

جوانب الملفات فى المجموعة الواحدة لا تساوى 2E ، كما حدث فى أولا ، وإنما يتعين علينا جمع المتجهين E ، E ، اللذين يحصران بينهما الزاوية θ ، لكى نحصل على محصلة القوى الدافعة الكهربية E_r فى مجموعة الملفات . وبذلك تصبح قيمة معامل اللف هى :

$$k_w = \frac{E}{q\,e} \times \frac{E_r}{2E} = k_d \times k_c \quad \cdots\cdots\cdots \quad (٥ - ٢)$$

ويطلق على المعامل k_d اسم معامل التوزيع (Distribution factor) ، وتحسب قيمته باستخدام المعادلة (٣ — ٢) حيث كان $k_w = k_d$ ، لأن $k_c = 1$. ويطلق على k_c اسم المعامل الوترى (Chording factor) ، وتحسب قيمته من المعادلة التالية (٦ — ٢) ، التى نحصل عليها بالرجوع إلى شكل (١ — ٢ ب) ، وتطبيق القاعدة المعطاة حيث :

$$k_c = \frac{E_r}{2E} = \frac{a\,a_4}{2aa_3} = \frac{a\,d}{aa_3} = \cos\frac{\theta}{2} \quad \cdots\cdots \quad (٦ - ٢)$$

معامل اللف عندما تكون q عددا كسريا :

يجب التمييز فى هذه الحالة بين الملفات أحادية ، أو مفردة الطبقة ، والملفات ثنائية ،أو مزدوجة الطبقة :

أولا : بالنسبة للملفات أحادية الطبقة يتحدد اتساع الملف على حسب نوع الملفات المستعملة (متمركزة أو ماسية . . . ألخ) ، وعلى حسب التغير فى عدد المجارى الخاصة بكل مرحلة تحت كل قطب ، لضبط القيمة المتوسطة المطلوبة لـ q . ويحدث تبعا لذلك تقصير فى الخطوة القطبيه تتحدد نسبته على حسب قيمة q . ويمكن الحصول على معامل اللف فى هذه الحالة بالاستعانة بمخطط نجمة المجارى ، فنجمع المتجهات الخاصة بإحدى المراحل، بعد تحديدها فى هذا المخطط ، ثم نقسم

طول محصلة هذه المتجهات على عددهـا مضروبا فى طول الواحـد منهـا . ويمكن عموما حساب قيمتى كل من k_c و k_d باستخدام المعادلتين (٣ — ٢) ، (٦ — ٢) مرة أخرى ، ولكن بالتعويض بقيمتين مكافئتين لـ q ونسبة التقصير، نحصل عليهما كما يأتى :

إذا وضعنا قيمة q على هيئة كسر غير حقيقى ، أى بالصورة $\frac{b}{C}$ ، يجب أن يكون عدد أزواج الأقطاب فى الآلة مكرراً صحيحا للعدد C ، حتى يمكن تنفيذ هذا النوع من الملفات ، كما سبق أن بينا فى الباب الاول . بهذا يمكن تقسيم المجارى إلى مجمـوعات متماثلة عـددها $\frac{2p}{C}$ وتحتوى كل مجموعة منها على b من المجارى

لكل مرحلة $\left(= \frac{\frac{b}{C} \times 2p \times 3}{\frac{2p}{C} \times 3} \right)$. وهذا يعنى أن كل مرحـلة أصبحت تتكون من مجموعات تحتل أماكن متماثلة بالنسبة للأقطاب ، وتحتوى كل منها على b من المجارى المتجاورة ، مما يجعلنا نستطيع حساب معامل التوزيع k_d فى هذه الحالة باستخدام العدد b ، كقيمة مكافئة، بدلا من q فى المعادلة(٣ — ٢). وإلى جانب هذا نجد أنه نظرا لأن اتساع الملف y ، مقـدرا بعـدد المجـارى بين جانبيه ، يجب أن يكون عددا صحيحا، فى حين يكون 3q فى الغالب عددا كسريا ، تنتج ملفات كسرية الخطوة غالبا فى هذه الحالة بنسبة التقصير $\frac{3q - y}{3q}$ ، التى يمكن استخدامها فى حساب المعامل الوترى k_c باستخدام المعادلة(١ — ٢). بذلك نحصل على معامل اللف k_w بضرب k_d فى k_c اللتين حصلنا عليهما .

ثانيا : بالنسبه للملفات مزدوجة الطبقة نجـــد أن حساب k_d يتبع نفس الطريقة التى اتبعت مع الملفات أحادية الطبقـــة . وذلك لأن ترتيب جوانب

الملفات فى الطبقات العلوية من المجارى يسير على نمط ترتيب جوانب الملفات أحادية الطبقة بالضبط ، كما سبق شرحه فى الباب الأول . وهذا يعنى أننا نستطيع حساب قيمة معامل التوزيع k_d فى هذه الحالة أيضا باستخدام العدد b كقيمة مكافئة بدلا من q فى المعادلة (٣ — ٢) . ولا توجد أية صعوبة بالنسبة لحساب المعامل الوترى k_c فى هذه الحالة باستخدام المعادلة (٦ — ٢) مرة أخرى ، وذلك نظراً لعدم وجود أية قيود يفرضها تنفيذ الملفات على y ، وإنما نستطيع أن نختار لها أية قيمة نشاء ، على حسب ما تفرضه علينا احتياجات التصميم .

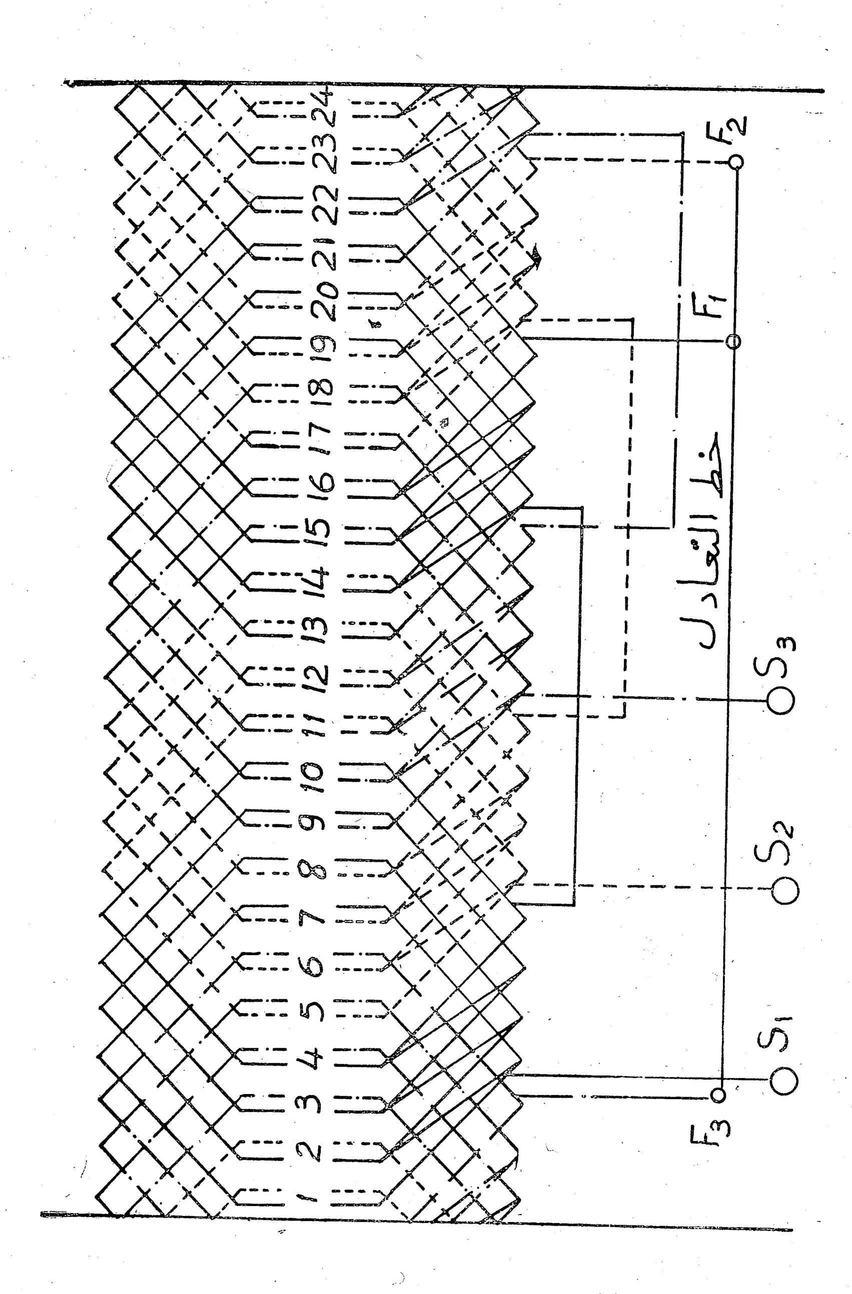
تأثير الانتشار المرحلى على معامل التوزيع ومقنن قدرة الالة :

فى الملفات أحادية الطبقة تنتشر المجارى ، التى تخص كل مرحلة تحت كل قطب ، على مدى ثلث الخطوة القطبية ، التى تمتد على سطح المنتج بما يساوى 180 درجة كهربية . ولذلك يقال إن الانتشار المرحلى للملفات يبلغ 60 درجة كهربية ، كما سبقت الاشارة اليه من قبل . ولكى يمكن توزيع الملفات على المجارى ، بحيث يسهل توصيلها معاً ، للحصول على أكبر قيمة ممكنة للقوة الدافعة الكهربية المرحلية ، وتكون المراحل الثلاثة متماثلة (symmetrical) ، يتحتم أن يكون الانتشار المرحلى لهذا النوع من الملفات بهذه القيمة ، أى 60 درجة كهربية .

أما فى الملفات مزدوجة الطبقة ، فاننا نستطيع توزيع المجارى على المراحل المختلفة بنفس الطريقة السابقة ، فنحصل على انتشار مرحلى للملفات مقداره 60 درجة كهربية . كما أننا نستطيع توزيع المجارى على المراحل المختلفة ، بحيث تنتشر المجارى ، التى تخص كل مرحلة ، على مدى ثلثى الخطوة القطبية ، حيث يصبح الانتشار المرحلى للملفات 120 درجة كهربية فى هذه الحالة . ويمكن تنفيذ الملف بأية قيمة لإتساع الملف ، كما فعلنا فى الحالات السابقة ، بخطوة كاملة أو بخطوة

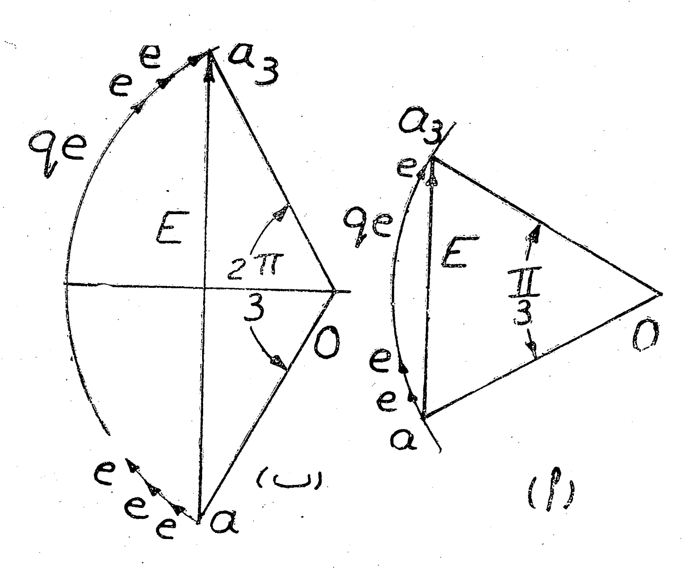
كسرية، شكل (٢ — ٢) ، فنحصل على معامل وترى يساوى الوحدة ، أو كسراً تحسب قيمته باستخدام المعادلة (٦ — ٢) ، على أساس أن θ هى مقدار التقصير فى الخطوة القطبية ، محسوبة بالدرجات الكهربية ، تماما على النحو السابق . ولكن معامل التوزيع يختلف فى هذه الحالة اختلافا بينا عن الحالة السابقة، كما يتضح مما يأتى :

إذا كانت قيمة q تساوى الواحد الصحيح فان قيمة معامل التوزيع ، كما تعطيها المعادلة (٣ — ٢) ، تصبح الوحدة على أى الحالات ، حيث تكون $e = E$ فى شكل (١ — ٢ أ) وتتوافقان معاً مرحلياً . فاذا زادت قيمة q عن واحد زاد عدد المتجهات e بنفس المقدار ، بحيث تقل قيمة k_d عن الواحد الصحيح . ويلاحظ أنه كلما ازدادت قيمة q كلما قلت قيمة معامل التوزيع ، حيث تزيد قيمة qe ، وذلك باعتبار قيمة ثابتة لـ E . وتصبح قيمة qe أكبر ما يمكن ، أى تصبح قيمة معامل التوزيع أصغر مايمكن ، عندما تصير قيمة q كبيرة جداً (مالانهاية) ، بحيث تنطبق المتجهات المتناهية فى الصغر e على القوس $a\,a_1\,a_2\,a_3$ ، كما يظهر فى شكلى (٣ — ٢ أ ، ب) فاذا فرضنا أساساً أن قيمة q كبيرة يمكننا اعتبار أن قيمة qe تمثل تقريبا بطول قوس الدائرة $a\,a_3$ ، المحصور بين طرفى المتجه المحصل E ، كما هو مبين فى شكلى (٣ — ٢ أ ، ب) ، حيث يمثل الشكل أ حالة ملفات ذات انتشار مرحلى 60 درجة كهربية ، ويمثل ب حالة ملفــات ذات انتشار مرحلى 120 درجة كهربية ، مع استخدام نفس القيمة لـ q فى الحالتين . هذا ويؤدى الافتراض بأن قيمة q متناهية فى الكبر إلى التسليم بأن قيمة الزاوية α تصبح متناهية فى الصغر فى الحالتين ، حيث $\alpha = \frac{60}{q}$ فى الحاله الأولى ، $\alpha = \frac{120}{q}$ فى الحالة الثانية . بذلك نستطيع أن نعتبر أن $\sin\alpha = \alpha$ فى


1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
F1
F2
F3
S1
S2
S3
خط التعادل

شكل (٢ — ٢)

الحالتين ، فنحصل على معامل التوزيع فى كل حالة باستخدام المعادلة (٣ — ٢) ، معدلة على هذا الأساس ، كما يأتى :



شكل (٣ — ٢)

الحالة الأولى ، عندما يكون الانتشار المرحلى $\frac{\pi}{3}$ (أى 60 درجة كهربية)

$$k_d = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \times \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{\frac{1}{2} \times \frac{\pi}{3}} = \frac{1}{2} \times \frac{6}{\pi} = 0.955 \quad \cdots \quad (٧—٢)$$

الحالة الثانية ، عندما يكون الإنتشار المرحلى $\frac{2\pi}{3}$ (أى 120 درجة كهربية)

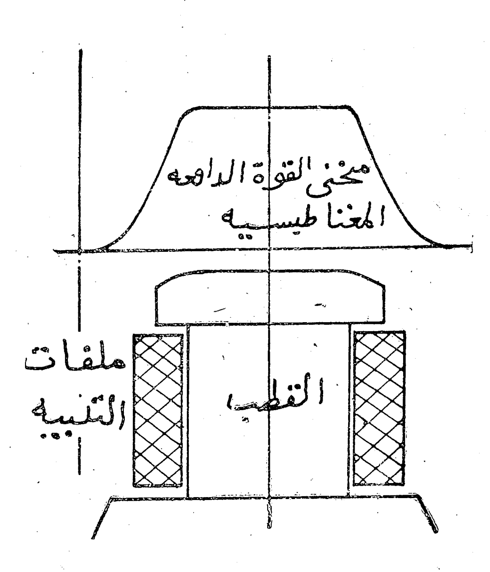
$$k_d = \frac{\sin \frac{2\pi}{3}}{\frac{1}{2} \times \frac{2\pi}{3}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 0.827 \quad \cdots\cdots \quad (٢—٨)$$

وهذا يعنى أنه بالنسبة لمولدين متماثلين من جميع النواحى ، يحتوى كل منهما على نفس عدد اللفات T_{ph} فى كل مرحلة ، ويكون الانتشار المرحلى للملفات الاول $\frac{\pi}{3}$ ، والانتشار المرحلى للملفات الثانى $\frac{2\pi}{3}$ ، نحصل على قوة دافعة كهربية مرحلية من الاول تساوى 1.10 $\left(= \frac{0.955}{0.827} \right)$ مرة تلك التى نحصل عليها من الثانى . فاذا استخدمنا نفس التيار فى الحالتين نحصل على مقنن قدرة من المولد الاول يزيد بمقدار ١٥٪ على مقنن القدرة الذى نحصل عليه من الثانى . وهذا هو ما يجعلنا نفضل فى الغالب استخدام الانتشار المرحلى الضيق ،فى حالة الملفات مزدوجة الطبقة هذا علاوة على أن تنفيذالف يكون بصورة أكثر سهولة ويسر ، وخاصة بالنسبة لتكوين الملفات ، فى حالة الملفات أحادية الطبقة ، مع الانتشار المرحلى الضيق $\left(\frac{\pi}{3}\right)$ ، أيضا .

التوافقيات فى منحنى المجال (Harmonics in field wave) :

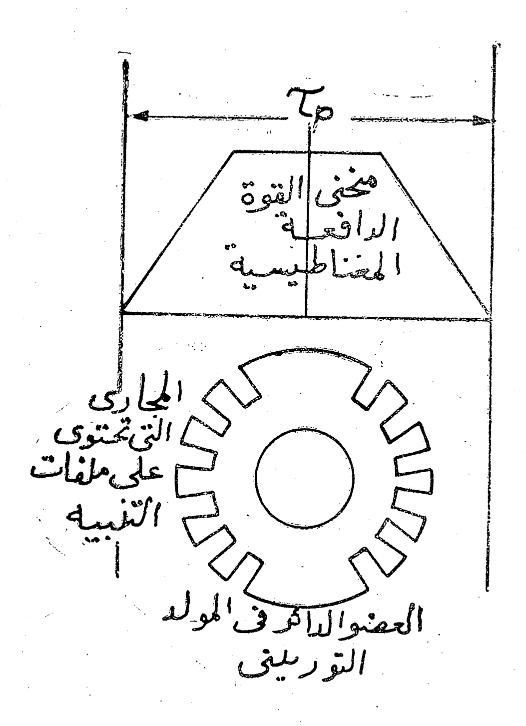
يوجد نوعان من الآلات المتزامنة يتميز كل منهما عن الآخر بطريقة تكوين الأقطاب المغناطيسية ، الموجودة على العضو الدائر ، وطريقة ترتيب ملفات التنبيه ، على هذه الأقطاب ، تبعا لذلك : **النوع الاول** ، ويطلق عليه اسم الآلات ذات الأقطاب البارزة (Salient pole machines) ، يحتوى على أقطاب من النوع البارز ،كما فى شكلى (٢ — ١) ، (٣ — ١) .وتكون ملفات التنبيه التى تستخدم فى هذه الحالة من النوع الاسطوانى ، وهى تعطى قوة دافعة مغناطيسية يكون توزيعها على مدى الخطوة القطبية كما هو مبين فى شكل (٤ — ٢) على وجه التقريب . **النوع الثانى** ، ويطلق عليه اسم الآلات التوربينية (Turbo machines) ، يحتوى على عضو دائر اسطوانى ذى مجارى موزعة على ثلثى المحيط ، تحتلها ملفات

التنبيه ،شكل (٥ —٢)، التى تعطى فى هذه الحالة مجالا مغناطيسيا ذا قطبين فقط ، بينما يكون عدد الأقطاب فى النوع الأول أربعة أو أكثر . لذلك فان سرعة الآلات التوربينية تكون 3000 لفة فى الدقيقة ، باعتبار تردد قياسي 50 ذبذبة فى الثانية .



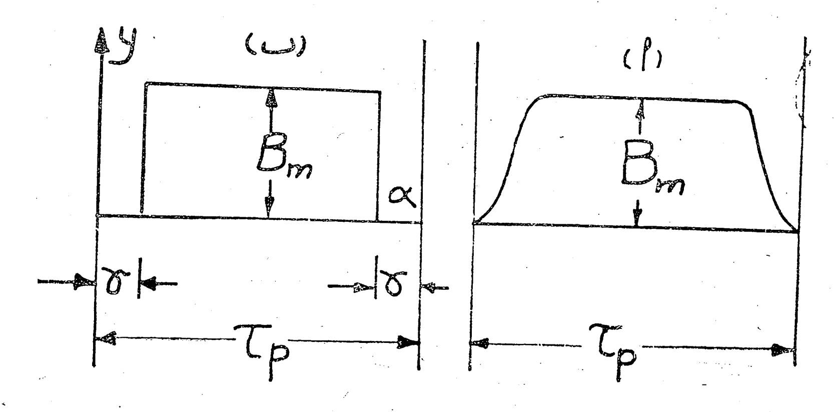
شكل (٤ — ٢)

ويكون توزيع القوة الدافعة المغناطيسية على مدى الخطوة القطبية ، كما هو مبين فى شكل (٥ — ٢) ويتوقف توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية فى الثغرة الهوائية ، على مدى الخطوة القطبية فى كلا النوعين ، على مقدار المقاومة المغناطيسية عند النقط المختلفة فى هذه الثغرة وعموما فانه ، علاوة على التوزيع الجيبى لهذه الكثافة ، الذى يصعب الحصول عليه عمليا ، والذى اتخذناه أساسا للحساب فى الحالات السابقة ، يكون توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية فى الثغرة الهوائية للآلات المتزامنة ، مع عمل ترتيبات معينة بالنسبة لإنحناء سطح القطب



شكل (٥ — ٢)

المواجه المنتج ، على نمط المنحنى المبين فى شكل (٦ — ٢ أ) ، الذى يمكن الاستعاضة عنه بالمنحنى المكافىء المستطيل الشكل المبين فى شكل (٦ — ٢ ب) ،



شكل (٦ — ٢ أ ، ب)

وهو يعطى نفس قيمة الفيض المغناطيسى لكل قطب ، على حسب ما سبق بيانه فى كتاب هندسة الآلات الكهربية آلات التيار المستمر (ص ٢٢٥ — ٢٢٨) . والسبب فى اللجوء إلى هذا المنحنى المستطيل الشكل هو إمكانية التعبير عنه بمعادلة رياضية ، بينما يصعب ذلك جداً بالنسبة للمنحنى الأصلى .

يمكن حساب القوة الدافعة الكهربية للآلة المتزامنة باستخدام المعادلات من (٢ — ٢) إلى (٦ — ٢) عندما يكون منحنى توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية فى الثغرة الهوائية على مدى الخطوة القطبيه ذا شكل جيبى . أما بالنسبة للمنحنى المبين فى شكل (٦ — ٢ ب) ، فيمكننا تحليله إلى توافقياته الأساسية والعالية (Fnudamental and higher hrrmonics) ، وتطبيق المعادلات السابقة على كل منها على حدة باعتباره منحنى جيبى ، كما سوف يتضح حالا .

التوافقيات فى منحنى الضغط المرحلى :

يبين شكل (٧ — ٢) منحنى توزيع كثافه الخطوط المغناطيسيه فى الثغرة الهوائية للآلة المتزامنة على مدى الخطوة القطبيه ، وبعض التوافقيات التى يمكن تحليله إليها ، بما فى ذلك التوافقية الأصلية ، باستخدام النظرية الرياضية المعروفة فى هذا الصدد ، وهى تحليل فورير المتوالى (Fourier's series analysis) فاذا كانت B_m هى اتساع (amplitude) الموجة المستطيلة الممثلة على مدى الخطوة القطبية (π من الدرجات الكهربية) على النحو التالى :

قيمة الدالة y هى $y = 0$ فى المدى من $\alpha = 0$ إلى $\alpha = \gamma$ ، ثم $y = B_m$ من $\alpha = \gamma$ إلى $\alpha = \pi - \gamma$ ، وأخيراً $y = 0$ من $\alpha = \pi - \gamma$ إلى $\alpha = \pi$.

ومع ملاحظة أن التحليل لايحتوى إلا على الجيوب من الدرجة الفردية (odd sines) ، لأن الدالة متماثلة حول نقطة الأصل ، نجد أن اتساع التوافقية

التى درجتها r هو :

$$B_r = \frac{2}{\pi} \int_0^{\gamma} 0.\sin r\alpha d\alpha + \frac{2}{\pi} \int_{\gamma}^{\pi-\gamma} B_m \sin r\alpha d\alpha$$

$$+ \int_{\pi-\gamma}^{\pi} 0.\sin r\alpha d\alpha = \frac{\cos r\gamma}{r} \cdot \frac{4B_m}{\pi} \quad \dots \quad (٢-٩)$$

وتصبح الدالة بتحليل فورييه المتوالى كما يأتى :

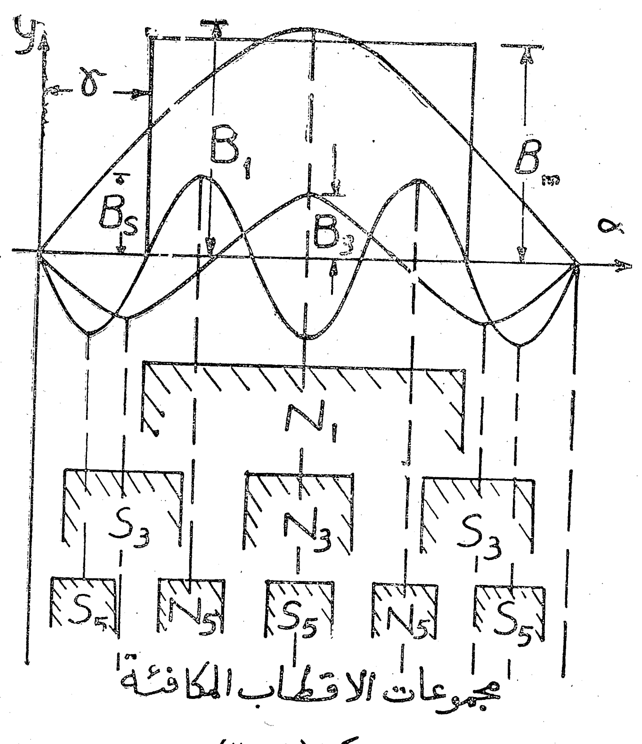
$$y = \frac{4B_m}{\pi} \Big[\cos\gamma \sin\alpha + \frac{\cos 3\gamma}{3} \sin 3\alpha$$

$$+ \frac{\cos 5\gamma}{5} \sin 5\alpha + \dots \Big] \quad \dots\dots \quad (٢-١٠)$$

يمكن اعتبار أن المنحنى الجيبى ، الذى تمثله كل توافقيـة من التوافقيـات فى المعادلة (٢ — ١٠) ، عبارة عن توزيع كثافة الخطوط المغنـاطيسية فى الثغرة الهوائية فى الآلة لمجموعة مكافئة ، وقائمة بذاتها من الأقطاب المغناطيسية ، شكل (٧ — ٢) ، وهى التى ينتج عن حركتهـا بالنسبة للفـات المنتج توليد توافقية مناظرة من الضغط فيها . ونستطيع الحصول على القيمة الفعالة لتوافقية الضغط التى درجتها r فى هذه الحالة باستخدام المعادلات من (٢ — ٢) إلى (٦ — ٢) مع أخـذ درجة التوافقية فى الاعتبار ، بالنسبة للعوامل المختلفة ، وذلك بمراعاة النقط الآتية :

١ — يكون تردد توافقية الضغط التى درجتها r هو $f_r = rf$ ، وذلك لأن توافقية كثافة الخطوط المغناطيسية التى أنتجتها ناشئة عن 2pr من الأقطاب المغناطيسية المكافئة، التى تدور بنفس سرعة التزامن n_s $\left(f = \frac{p\, n_s}{60} \right)$ ،

كما يتضح من شكل (٧ — ٢) .



شكل (٧ — ٢)

٢ — حيث أن عدد الأقطاب المغناطيسية المكافئة، لتوافقية كثافة الخطوط التى درجتها r ، هو 2 pr كما يتضح من شكل (٧ — ٢) ، فان كل زاوية يكون مقدارها بالدرجات الكهربية هو α ، باعتبار مجموعة الأقطاب الأساسية (fundamental) ، يصبح مقدارها بالدرجات الكهربية $r\alpha$ ، وذلك بالنسبة لكل ما يخص التوافقية التى درجتها r (الزاوية بالدرجات الكهربية = الزاوية الأصلية بالدرجات الميكانيكية × 2 pr) .

لذلك نجد أن قيمة كل من معامل التوزيع والمعامل الوترى تصبح بالنسبة

للتوافقية التى درجتها r عبارة عن :

$$k_{dr} = \frac{\sin \frac{q\alpha r}{2}}{q \sin \frac{\alpha r}{2}} \quad , \quad k_{cr} = \cos \frac{r\theta}{2} \quad \dots\dots \quad (٢—١١)$$

٣ — إذا كان طول الخطوة القطبية الأصلية على الآلة هو τ_p من السنتيمترات، يصبح طول الخطوة القطبية فى مجموعة الأقطاب المكافئة، للتوافقية التى درجتها r ، عبارة عن $\frac{\tau_p}{r}$. وبذلك يكون الفيض المغناطيسى ϕ_r ، الناتج عن كل قطب من هذه الأقطاب، بالخطوط هو :

$$\phi_r = \frac{\tau_p}{r}\, l_i\, B_r \times \frac{2}{\pi} \quad \dots \quad \dots \quad (٢—١٢)$$

وذلك باعتبار أن $\frac{2}{\pi} \times B_r$ هى القيمة المتوسطة لكثافة الخطوط المغناطيسية لهذه التوافقية فى الثغرة الهوائية و l_i هو طول الآلة المثالى بالسنتيمترات (كتاب هندسة الآلات الكهربية ، آلات التيار المستمر ص ٢٢٧). B_r كما تعطيها المعادلة (٩—٢) .

فاذا كانت E_r هى القيمة الفعالة لتوافقية الضغط ، التى درجتها r فى منحنى الضغط ، نجد بناء على ما سبق كله أن :

$$E_r = 4.44\, f_r\, \phi_r\, T_{ph}\, k_{dr}\, k_{cr} \times 10^{-8}\, V \quad \dots \quad \dots \quad (٢—١٣)$$

حيث ϕ_r و k_{cr} و k_{dr} كما تعطيها المعادلتان (١١—٢) ، (١٢—٢) .

ويكون تمثيل منحنى الضغط المرحلى (بالنسبة للمرحلة الأولى) بتحليل فوريير المتوالى عبارة عن :

$$e_1 = \sqrt{2}E_1\sin\omega t + \sqrt{2}E_3\sin 3\omega t + \sqrt{2}E_5\sin 5\omega t + \cdots \quad (١٤—٢)$$

وتكون قيم ... E_1, E_3, E_5 من المعادله (١٣ — ٢) باستخدام $r = 1,3,5 \ldots$ ، ويحتوى منحنى الضغط المرحلى على توافقيات بنفس درجات توافقيات منحنى توزيع كثافة الخطوط المغناطيسيةفى الثغرة الهوائيه ، وتكون القيمة الفعاله للضغط المرحلى فى الآلة عبارة عن :

$$E_{ph} = \sqrt{E^2_1 + E^2_3 + E^2_5 + \ldots} \quad \cdots\cdots \quad (١٥—٢)$$

تأثير معامل التوزيع والمعامل الوترى على توافقيات الضغط المرحلى :

يبين الجدول الآتى قيم معامل التوزيع للتوافقيات ذات الدرجات المختلفة ، من 1 إلى 19 ، وذلك عندما تختلف قيمة q من 2 إلى 6 .

ويتضح من هذا الجدول أن قيمة معامل التوزيع تقل بدرجة ملحوظة فى التوافقيات التى تزيد درجتها عن 1 ، فيما عدا التوافقتين الحادية عشرة والثالثة عشرة عندما تكون $q = 2$ ، وكذلك التوافقتين السابعة عشرة والتاسعة عشرة عندما تكون $q = 3$. فاذا راعينا أن قيمة B_r تقل هى الأخرى بصورة ملحوظة فى التوافقيات ذات الدرجات العالية ، يمكننا أن نقول إن توافقيات الضغط ذات الدرجات العالية تكون فى الغالب ذات اتساع صغير بالنسبة لإتساع التوافقية الأصلية . أما بالنسبة للاشارة السالبة ، التى تسبق بعض قيم معامل التوزيع فى الجدول ، فانها تشير إلى ظهور تأثير جديد لتوزيع الملفات فى مجارى متجاورة عددها q بالنسبة للمرحلة الواحدة ، وهى تعنى أن التوافقية قد أصبحت فى هذه الحاله فى اختلاف مرحلى مع التوافقية الأساسية مقداره 180 درجة كهربية .

يتضح من المعادلة (١١—٢) أننا نستطيع حذف أية توافقية من التوافقيات

r	q = 2	q = 3	q = 4	p = 5	q = 6
1	0.9659	0.9598	0.9577	0.9567	0.9561
3	0.7071	0.6667	0,6533	0.6472	0.6440
5	0.2588	0.2176	0.2053	0.2000	0.1972
7	−0.2588	—0.1774	—0.1576	—0.1494	—0.1453
9	−0.7071	—0.3333	−0.2706	—0.2472	—0.2357
11	—0.9659	—0.1774	−0.1261	—0.1095	—0.1017
13	—0.9659	0.2176	0.1261	0.1022	0.0920
15	—0.7071	0.6667	0.2706	0.2000	0.1726
17	—0.2588	0.9598	0.1576	0.1022	0.0837
19	0.2588	0.9598	—0.2053	—0.1095	—0.0837

حذفا تاما من منحنى الضغط المرحلى عندما نعوض عن r بدرجة هذه التوافقية،
ونحصل على قيمة k_{cr} تساوى صفرا ، أى عندما تكون قيمة $\frac{r\theta}{2}$ تساوى
$\frac{3\pi}{2}$ أو $\frac{\pi}{2}$. وهذا يستلزم إعطاء الزاوية θ قيمة معينة فى هذه الحالة ، أى
عمل تقصير فى خطوة الملف أو اتساعه بنسبة معينة . فاذا أردنا حذف التوافقية
الثالثة مثلا يجب أن تكون قيمة $\theta = \frac{\pi}{3}$ أو 60 درجة كهربية، وهذا يعنى
استخدام خطوة أو اتساع للملف مقداره ثلثا الخطوة القطبية ، أى 120 درجة

كهربية . كما أنه يمكن حذف التوافقية السابعة بجعل $\frac{\pi}{7} = \theta$ ، والتوافقية الخامسة بجعل $\frac{\pi}{5} = \theta$. وفى الواقع أننا نستطيع خفض قيمة الضغط إلى حد كبير (إلى الربع تقريبا)، لكل من هاتين التوافقتين الأخيرتين، باتخاذ اتساع الملف وسطا بين الحدين اللذين يسمحان بحذفها ، وهو خمسة أسداس الخطوة القطبية فى هذه الحالة ، أى بزاوية تقصير مقدارها 30 درجة كهربية، بما يناظر نسبة تقصير مقدارها السدس .

هذا ويراعى عند كتابة معادلة الضغط المرحلى على الصورة المبينة فى المعادلة (١٤—٢) أن تؤخذ اشارات توافقيات الضغط المختلفة $E_1 , E_3 , E_5 , \ldots$ فى الحساب ، كما تحددها المعاملات k_{dr} و k_{cr} فى المعادلة (١١—٢) ، وذلك حتى يمكن تحديد مقدار التوافق أو الاختلاف المرحلى بين كل توافقية والتوافقية الأصلية .

نخرج من هذا كله بنتيجة هامة ، وهى أنه فى الآلات المتزامنة ، التى تتراوح فيها قيمة q بين 2 و 6 ، والتى يكون اتساع الملفات فيها بنسبة تقصير تقع بين الثلث والسدس ، نحصل على قوة دافعة كهربية مرحلية من الآلة تتحدد أساساً ، وبدرجة تقريب مقبولة ، باستخدام التوافقية الأساسية فى منحنى توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية فقط ، وهى ذات الاتساع B_1 ، أى أن :

$$E_{ph} \simeq 4.44\, p\, \frac{n_s}{60} \times \tau_p\, l_i\, B_1 \times \frac{2}{\pi} \times T_{ph}\, k_d\, k_c \times 10^{-8}\ V$$

$$\simeq 3.12\, f\, \tau_p\, l_i\, B_m\, T_{ph}\, k_d\, k_c \times 10^{-8}\ V \quad \ldots \quad (١٦ \quad ٢)$$

وذلك باعتبار أن منحنى توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية فى الثغرة

الهوائية أمام القطب كما هو مبين فى شكل (٦ — ٢ ب) ، حيث أن γ تساوى 30 درجة تقريبا .

التوافقيات فى الضغط الخطى :

باستخدام المعادلة (١٤ — ٢)، ووضع $(\omega t - 120)$ ثم $(\omega t - 240)$ بدلا من ωt ، يمكننا الحصول على معادلتى الضغط فى المرحلتين الثانية والثالثة ، بحيث تصبح معادلات الضغط فى المراحل الثلاث هى :

$$e_1 = \sqrt{2}\, E_1 \sin \omega t + \sqrt{2}\, E_3 \sin 3\omega t + \sqrt{2}\, E_5 \sin 5\omega t + \ldots$$

$$e_2 = \sqrt{2}\, E_1 \sin (\omega t - 120) + \sqrt{2}\, E_3 \sin 3\,(\omega t - 120) + \ldots$$

$$= \sqrt{2}\, E_1 \sin (\omega t - 120) + \sqrt{2}\, E_3 \sin 3\omega t + \ldots$$

$$e_3 = \sqrt{2}\, E_1 \sin (\omega t - 240) + \sqrt{2}\, E_3 \sin 3\,(\omega t - 240) + \ldots$$

$$= \sqrt{2}\, E_1 \sin (\omega t - 240) + \sqrt{2}\, E_3 \sin 3\omega t + \ldots \quad (٢ — ١٧)$$

وهذا يعنى أن التوافقيات ذات الدرجة الثالثة ومضاعفاتها الفردية (9 , 15 . . . . ألخ) تكون فى توافق مرحلى فى المراحل الثلاث ، مما يؤدى إلى حدوث الظواهر الآتية عند توصيل مراحل المولد نجمه أو دلتا :

أولا ، عند توصيل المراحل نجمة : نظراً لأن الضغط الخطى فى هذه الحالة يكون عبارة عن الفرق بين ضغطى مرحلتين متعاقبتين (هندسة الآلات الكهربية المبادىء الأساسية ص ١٧٩) ، لاتظهر التوافقيات ذات الدرجة الثالثة ومضاعفاتها الفردية فى الضغط الخطى المولد ، حيث تتعادل كل اثنين منها من نفس الدرجه معا . لذلك فانه عند حساب قيمة الضغط الخطى المولد ، فى هذه الحالة ، لايجب ضرب الضغط المرحلى فى $\sqrt{3}$ مباشرة ، وإنما تحذف أولا

توافقيات الضغط ذات الدرجة الثالثة ومضاعفاتها الفردية من الضغط المرحلى ، فنحصل على قيمة الضغط الخطى E_L ، على هذا الأساس ، كما يأتى :

$$E_L = \sqrt{3}\ \sqrt{E^2_1 + E^2_5 + E^2_7 + E^2_{11} + \ldots} \quad \ldots (٢—١٨)$$

ثانيا ، عند توصيل المراحل دلتـا : إن امكانية توصيل المراحـل دلتـا هو نتيجة مباشرة لأن مجموع القيم اللحظية للضغط فى هذه المراحل يساوى صفراً دائما، أى أن $e_1 + e_2 + e_3 = 0$ (هندسة الآلات الكهربية ، المبادى الأساسية ص ١٨٢) . ولكن عند وجود توافقيات من الدرجة الثالثة ومضاعفاتها فى الضغوط المرحلية الثلاثة تكون الدلتا دائما دائرة قصر، بالنسبة للتوافقيات الثلاث من كل درجة مجتمعة معاً ، فتمر تيارات قصر محلية حول الدلتا بداخلها . وتتوقف قيمة كل تيار من هذه التيارات على معاوقة ملفات المراحل الثلاث فى الدلتا المقفلة ، التى تتحدد حسب درجة التوافقية ، كما يتضح من الآتى :

إذا كانت مقاومة ملفات المنتج المرحلية هى R_a أوم ، وممانعة نفس هـذه الملفات المرحلية هى x_a أوم ، وذلك عند التردد الأساسى (fundamental frequency f) نجد أن : ١ — بالنسبة لتوافقيات الدرجة الثالثة تكون محصلة الضغط حول الدلتا المقفلة $3E_3$ ، والممانعة المرحلية للملفات $3x_a$ أوم ، فتطعى تيار قصر داخل الدلتا قيمته الفعالة I_3 ، حيث :

$$I_3 = \frac{3\,E_3}{3\sqrt{R^2_a + (\ 3x_a\ )^2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (٢—١٩)$$

٢ — بالنسبة لتوافقيات الدرجة $3n$ حيث $n = 1, 3, 5 \ldots$ ، يكون محصلة الضغط حول الدلتا $3E_{3n}$ ، والممانعة المرحلية للملفات $3nx_a$ أوم ، فتعطى تيار قصر داخل الدلتا قيمته الفعالة I_{3n} (n عدد صحيح فردى) ، حيث :

$$I_{3n} = \frac{E_{3n}}{\sqrt{R^2_a + (3n\,x_a)^2}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٢-٢٠)$$

تكون قيمة x_a فى الآلات المتزامنة فى العادة أكبر من R_a كثيراً ، مما يجعلنا نستطيع اهمال R_a بالنسبه إلى $3nx_a$ ، حتى عندما تكون $n = 1$ ، فنحصل على تيار قصر متخلف مرحليا عن ضغط التوافقية التى أنتجته بزاويه مقدارها 90 درجة كهربية . وحيث أن هذه التوافقيات جميعها فى اتفاق مرحلى أو مختلفه مرحليا بزاوية 180 درجة (على حسب اشارة E_{3n}) ، فان تيارات القصر الناتجة عنها تكون هى الأخرى فى اتفاق مرحلى أو مختلفة مرحليا بزاوية 180 درجة ، وتكون قيمة تيار القصر الكلى I_{t3} فى الدلتا عبارة عن :

$$I_{t3} = \sqrt{I^2_3 + I^2_9 + I^2_{15}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٢-٢١)$$

وكل تيار تردده مكرر ثلاثة أمثال التردد الأساسى f ، وتوضع الإشارة سالبة أو موجبة أمام قيمة كل تيار على حسب ما إذا كانت توافقية الضغط التى انتجته سالبة أو موجبة .

ويلاحظ أن كل تيار من تيارات القصر هذه يعطى هبوط ضغط فى المرحلة يساوى ضغط التوافقيه التى أنتجته ، مما يؤدى إلى عدم ظهور ضغوط التوافقيات ذات الدرجة الثالثة ومضاعفاتها الفردية فى ضغط الدلتا عند قياسه بين خطين . لذلك فاننا نحصل على الضغط المرحلى فى حالة التوصيل دلتا (وهو يساوى أيضا الضغط الخطى) من المعادلة الآتية :

$$E_{ph} = \sqrt{E^2_1 + E^2_5 + E^2_7 + E^2_{11} + \ldots} \quad \ldots \quad (٢-٢٢)$$

أما إذا فتحت الدلتا لأى سبب من الأسباب فان الضغط المرحلى الذى يمكن قياسه بين خطين من الخطوط يصبح :

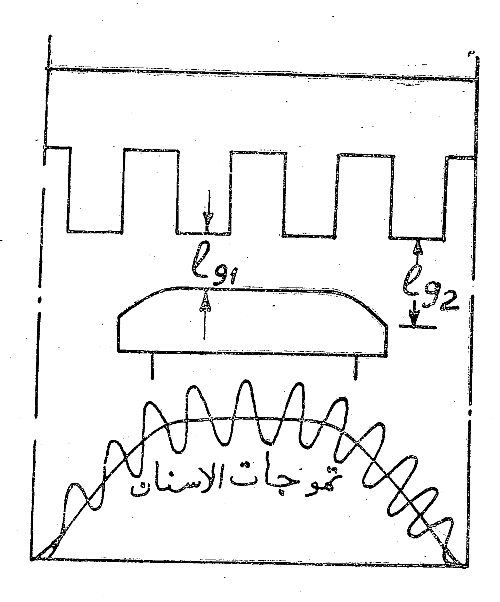
$$E_{ph} = \sqrt{E^2{}_1 + E^2{}_3 + E^2{}_5 + \ldots} \quad \ldots\ldots \quad (٢ - ٢٣)$$

وبسبب وجود تيار القصر ، المعطى بالمعادلة (٢١ — ٢) ، فى الدلتا المقفلة ، نتفادى فى العادة توصيل مراحل المولدات المتزامنة على شكل دلتا ، وذلك لأن تيار القصر يؤدى إلى حدوث مفقودات نحاسية زائدة فى ملفات المولد ، مما قد يتسبب عنه زيادة فى ارتفاع درجة حرارتها عن الحد المقرر . هذا علاوة على ما قد ينجم من متاعب فنية (Technical troubles) أخرى يضيق النطاق هنا عن حصرها نتيجة لوجود هذا التيار . لذلك فان الشائع هو توصيل مراحل المولدات المتزامنة (والمحركات أيضا) نجمة ، وعندما نضطر ، بسبب احتياجات معينة ، إلى توصيلها دلتا ، تجب مراعاة أن يكون اتساع الملفات فى الآله عند تصميمها اذا نسبة تقصير مقدارها الثلث ، لكى نتخلص من التوافقيات ذات الدرجات الثالثة ومضاعفاتها المفردة فى منحنى الضغط ، كما سبق شرحه .

تموجات الاسنان (Tooth ripples) :

تتوقف قيمة القوة الدافعة الكهربية المرحلية التى تعطيها الآله على عدد الخطوط المغناطيسية التى يذشئها كل قطب فى الثغرة الهوائية للآلة ، كما يتوقف شكل منحنى الضغط المرحلى على شكل منحنى كثافة الخطوط المغناطيسية على مدى الخطوة القطبية فى هذه الثغرة . وقد سبق أن ذكرنا أن منحنى القوة الدافعة المغناطيسية لملفات التنبيه ، ذات الترتيب الثابت على الأقطاب المغناطيسية ، يكون ذا شكل ثابت ومحدد ، يتوقف على شكل الاقطاب وطريقة تزويدها بملفات التنبيه ، كما هو مبين فى شكلى (٤ — ٢) ، (٥ — ٢) . وخرجنا من هذا كله باتخاذ شكل معين لمنحنى توزيع كثافة الخطوط المغناطيسية فى الثغرة الهوائية الآله ، يتوقف على طول هذه الثغرة عند النقط المختلفة على مدى الخطوة القطبية .

ثم حددنا توافقيات الضغط فى منحنى الضغط المرحلى بناء على هذا الشكل . وعلى الرغم من أن العامل الحاسم فى تحديد شكل منحنى الضغط المرحلى،فى هذه العمليات المتعاقبة ، هو تغير طول الثغرة الهوائية ، التى تتركز فيها المقاومة المغناطيسية على مدى الخطوة القطبية ، فقد أهملنا عاملا مؤثرا فى هذا المضمار ، عندما أعتبرنا أن طول الثغرة الهوائية هو المسافة المقاسة فى هذا الاتجاه نصف القطرى بين وجه القطب والسطح الداخلى للمنتج ،كما هو مبين فى شكل (٨ — ٢) . ذلك لأن تحديد



شكل (٨ — ٢)

طول الثغرة الهوائية على هذا الأساس يعتبر صحيحا إذا كان سطح المنتج هذا من الحديد الخالص ، ولا تتعاقب فيه الأسنان والمجارى كما هو حادث فعلا .

لهذا كله ينبغى عمل تصحيح معين فى منحنى الضغط يكون باضافة توافقية ضغط جديدة اليه ، وهى التى تنتج بسبب التوافقية المستحدثة فى منحنى توزيع خطوط القوى المغناطيسية فى الثغرة الهوائية ، الناشئة عن التذبذب فى قيمة

المقاومة المغناطيسية عند النقط المختلفة فى هذه الثغرة ، بسبب تواجد هذه النقط أمام الأسنان فى أماكن معينة على مدى الخطوة القطبية ، وتواجدها أمام المجارى فى أماكن أخرى . يطلق على التموجات الناشئة فى منحنى توزيع خطوط القوى المغناطيسية فى هذه الحالة اسم تموجات الأسنان ، وتكون قيمة التغير فى الضغط المرحلى للآلة بسببها طفيفة جدا لاتذكر ، بحيث يمكن اهمالها على الدوام . ولكن خطورة وجود توافقيات الضغط ، الناتجة عن هذه التوجات ، فى منحنى الضغط ، تأتى من أنها ذات تردد كبير نسبيا ، مما يجعلها تتسبب فى احداث أصوات مزعجة (طنين أوضجة) فى أجهزة التليفون التى تمتد خطوطها بجوار خطوط نقل القدرة الكهربية التى يغذيها المولد . ويكون ذلك بسبب التيارات المنتجة بالتـــأثير فى خطوط التليفون ، بفعل التيارات التى تمررها توافقيات الضغط ذات التردد العالى فى خطوط نقل القدرة الكهربية . ويمكن تحديد قيمة هـذا التردد العـالى ، الذى يطلق عليه اسم تردد ضغط الأسنان على النحو التالى :

تمتد الذبذبة الواحدة فى توافقية القوة الدافعة المغناطيسية الأساسية (التى ترددها f ذبذبة فى الثانية) فى الثغرة الهوائية على مدى خطوتين قطبيتين كاملتين من سطح العضو الدائر . ونظرا لأن الحركة النسبية بين المنتج والمجال المغناطيسى هى التى يعول عليها بالنسبة لتحديد التردد ، فاننا نستطيع ، للحصول على النتيجة النهائية ، أن نعتبر أن المنتج هو الذى يدور (فى الإتجاه العكسى) بالسرعة n_s ، وأن الأقطاب ثابتة . وفى هذه الحالة نجد أن أية نقطة فى الثغرة الهوائية يمر عليها بالتعاقب عدد من الأسنان أو المجارى مقداره 6q (وهو ما يساوى عدد المجارى على مدى خطوتين قطبيتين كاملتين) مقابل ذبذبة واحدة فى توافقية القوة الدافعة المغناطيسية الأساسية ، وذلك عندما تكون q عددا صحيحا . ونظراً لأن

مرور سنة وبجرى معا عبر النقطة المذكورة يؤدى إلى عمل دورة كاملة فى تموجات الأسنان ، فان هذا يعنى أن تردد هذه التموجات، وهو ما نرمز اليـــه بالرمز f_s ونطلق عليه اسم تردد تموجات الأسنان، يساوى 6qf ذبذبة فى الثانية ، حيث f هو التردد الأساسى بالذبذبة فى الثانية ، أى أن :

تردد تموجات الأسنان f_s = الترددالأساسى f × عدد المجارى لكل زوج أقطاب 6q . يقل التأثير الناشىء عن تموجات الأسنان ، بسبب انخفاض مقدار التغير فى المقاومة المغناطيسية للثغرة الهوائية الناتج من وجود المجارى ، إذا كانت q عددا كسريا وهذا يبين فائدة جديدة لإستخدام الملفات كسرية المجرى .
ونظراً لأن المقاومة المغناطيسية للثغرة الهوائية فى مقابل وجه القطب تتوقف فى الواقع على مساحة حديد الأسنان المحصور بين طرفى القطب . فانه يمكن تقليل التغير فى قيمة هذه المقاومة باتخاذ علاقة معينة بين خطوة السنة وعرض حذاء القطب . ولكننا لا نتوقع أن يؤدى ذلك إلى الغاء تموجات الأسنان ، بسبب المفقودات الحديدية التى تحدث فى حديد الأسنان .

إذا اعتبرنا أن الفيض المغناطيسى الأساسى هو ϕ_1 ، ولا يوجد معه سوى الفيض الناشىء عن تموجات الأسنان ، ونرمز اليه بالرمز ϕ_s ، تكون القيمة اللحظية للفيض المغناطيسى المتسلسل (linked with) مع ملفات المنتج هى :

$$\phi = (\phi_1 + \phi_s \sin 2\pi f_s t) \cos 2\pi f t$$
$$= \phi_1 \cos 2\pi f t + \tfrac{1}{2}\phi_s [\sin 2\pi (f_s - f) t + \sin 2\pi (f_s + f) t]$$

وتكون القوة الدافعة الكهربية التى ينتجها هذا الفيض المغناطيسى هى :

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8}\,V = 2\pi f N \phi_1 \sin 2\pi f t \times 10^{-8}$$

$$- \frac{\phi_s N}{2 \times 10^8} [2\pi (f_s - f) \cos 2\pi (f_s - f) t$$

$$+ 2\pi (f_s + f) \cos 2\pi (f_s + f) t]$$

وهذا يعنى أن تموجات الأسنان تؤدي إلى وجود توافقيتين فى منحنى الضغط احداهما بالتردد $(f + f_s)$ أى $f(6q + 1)$ ، والأخرى بالتردد $(f_s - f)$ أى بالتردد $f(6q - 1)$.

امثلة محلولة على البابين الاول والثانى

(1) a 3 - phese, 16 pole alternator has a star connected winding with 144 slots and 10 conductors per slot. The flux per pole is 3 megalines, sinusoildally distriduted and the speed is 375 r.p.m. i) Sketch the winding arrangement over 4—pole pitches, indicating the number of coil groups in each phase and the starts of the phases if the winding is single layer concentric with two plane end connections; ii) Find the frequency and the phase and line e.m.f.s.

i) بالنسبه لرسم الملفات :

$$q = \frac{S}{3 \times 2p} = \frac{144}{3 \times 16} = 3$$ مجرى لكل مرحلة/قطب

$$\alpha' = \frac{360\,F}{S} = \frac{360 \times 8}{144} = 20$$ درجة كهربية

$$\alpha = \frac{360\,p}{S} = \frac{360 \times 8}{144} = 20$$ درجة كهربية

نرسم مخطط متجهات المجارى ، وسوف نجـد انه يحتوى عـلى 18 متجه فى الدورة الواحدة ، ويتكون من ثمانى دورات ، تمثل كل دورة منها جوانب الملفات تحت قطبين . لذلك نكتفى بدورتين فقط لرسم الملفات تحت أربعة أقطاب ويتبين لنا من هذا أن الآلة يمكن أن توصل على نمط الف الانطباقى المعروف فى آلات التيار المستمر ، فتحتوى على ثمانية مسارات متوازية ، بعدد أزواج الأقطاب (قارن بشكلى (١٦—١ب) ، (١٧ - ١ب)) . ويكون توصيل الملفات كما هو مطلوب ، على نمط شكل (٤—١) (مخطط متجهات المجارى (٣ ١ أ))، غاية ما فى الأمر أن $q = 3$ فى هذه الحالة ، بينما $q = 2$ بالنسبة لشكل (٤ — ١).

نحصل على عدد مجموعات الملفات فى كل مرحلة على النحو التالى :

عدد الملفات فى كل مجموعة ملفات تحت قطبين ($q = 3$) = ٣

عدد مجموعات الملفات فى كل مرحلة = $p = 8$ = ٨

∴ عدد الملفات فى كل مرحلة = $8 \times 3 = 24$ ملف

وحيث أن عدد الموصلات فى كل مجرى = 10 موصل

∴ عدد اللفات فى كل ملف = 10 لفة

(يطلق على عدد اللفات فى الملف الواحد أحيانا عدد الدورات ، حيث تناظر الدورة لفة واحده) .

∴ عدد اللفات فى كل مرحلة : لفة $240 = 10 \times 24 = T_{ph}$

ويمكننا الحصول على نفس هذه النتيجة باستخدام المعادلة (٢ — ١) :

$$T_{ph} = \frac{uS}{6} = \frac{10 \times 144}{6} = 240 \text{ turns}$$

ii) $f = \frac{p\,n_s}{60} = \frac{8 \times 375}{60} = 50$ c/s

$$k_d = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 30}{3 \sin 10} = 0.96$$: معامل التوزيع

المعامل الوترى : (لعدم وجود تقصير فى خطوة الملف) $k_c = 1$

$k_w = k_d \times k_c = 0.96$ معامل الملف

$E_{ph} = 4.44\, f\, \phi\, T_{ph}\, k_w \times 10^{-8}$

$= 4.44 \times 50 \times 3 \times 10^6 \times 240 \times 0.96 \times 10^{-8}$

$= 1534$ V

E_L (الضغط الخطى) $= \sqrt{3}\, E_{ph} = 2655$ V

(2) Determine the root — mean — square value of the individual harmonic components and of the total induced e.m.f. per phase of a 50 c/s, 3 — phase, alternator from the following data : no. of poles = 10, slots per pole per phase = 2. Conductors per slot (double layer) = 4, coil span = 150°. Flux per pole (fundamental) 12 megalines. The analysis of the gap flux density shows a 20 % third harmonic. 12 % fifth harmonic and 8 % seventh harmonic. All coils of a phase are connected in series. Find also the Value of the line Voltage when the alternator is connected in star.
If the armature winding has a resistance of 2 ohms and an inductance of 40 m H. per phase, calculate the circulating current inside the delta connected windings and the phase voltage on open circuit.

باستخدام المعادلات (١١—٢) ، (١٢—٢) ، (١٣—٢) نجد أن :

$$k_{d1} = \frac{\sin 30}{2 \sin 15} = 0.966 \; , \; k_{c1} = \cos 15 = 0.9659$$

$$\left(\alpha = \frac{360 \times 5}{2 \times 3 \times 10} = 30^\circ \quad . \quad \theta = 180 - 150 = 30^\circ \right)$$

$$k_{d3} = \frac{\sin 3 \times 30}{2 \sin 3 \times 15} = 0.707 \; ,$$

$$k_{c3} = \cos 3 \times 15 = 0.707$$

$$k_{d5} = \frac{\sin 5 \times 30}{2 \sin 5 \times 15} = 0.2585 \; ,$$

$$k_{c5} = \cos 3 \times 15 = 0.2588$$

$$k_{d7} = \frac{\sin 5 \times 30}{2 \sin 7 \times 15} = - 0.5285 \; ,$$

$$k_{c7} = \cos 7 \times 15 = - 0.2588$$

$$E_1 = 4.44 \times 50 \times 12 \times 10^6 \times 40 \times 0.966 \times 0.9659$$

$$\times 10^{-8} = 995 \text{ V}$$

$$\left(T_{ph} = \frac{4 \times 2 \times 3 \times 10}{2 \times 3} = 40 \right)$$

$$E_3 = 4.44 \times 3 \times 50 \times \left(0.2 B_1 l_i \frac{\tau_p}{3} \times \frac{2}{\pi} \right)$$

$$\times 40 \times 0.707 \times 0.707 \times 10^{-8}$$

$$= 4.44 \times 50 \times 0.2 \times 12 \times 10^6 \times 40 \times 0.707$$

$$\times 0.707 \times 10^{-8} = 106.5 \text{ V}$$

$$E_5 = 4.44 \times 50 \times 0.12 \times 12 \times 10^6 \times 40 \times 0.2585$$
$$\times 0.2588 \times 10^{-8} = 8.56 \text{ V}$$

$$E_7 = 4.44 \times 50 \times 0.08 \times 12 \times 10^6 \times 40 \times -0.2585$$
$$\times -0.2588 \times 10^{-8} = 5.7 \text{ V}$$

$$E_{ph} = \sqrt{E^2_1 + E^2_3 + E^2_5 + E^2_7}$$
$$= \sqrt{(995)^2 + (106.5)^2 + (8.56)^2 + (5.7)^2}$$
$$\simeq 1000 \text{ V}$$

الضغط الخطى لتوصيل نجمة : (باستخدام) المعادلة (١٨ — ٢) نجد أن :

star connection : $E_L = \sqrt{3}\ \sqrt{E^2_1 + E^2_5 + E^2_7} = 1725 \text{ V}$

لحساب تيار القصر داخل الدلتا نستخدم المعادلة (١٩ — ٢) حيث :

$$R_a = 2 \quad , \quad x_a = \omega L = 314 \times 0.04 = 12.56 \text{ ohms}$$

$$I_3 = \frac{E_3}{\sqrt{R^2_a + (3\,x_a)^2}} = \frac{106.5}{3.77} \simeq 2.83 \text{ amps.}$$

الضغط المرحلى يساوى الضغط الخطى عند توصيل دلتا ، حيث :

$$E_{ph} = E_L = \sqrt{3}\ \sqrt{E^2_1 + E^2_5 + E^2_7} = 1725 \text{ V}$$

(3) Design the armature winding of a synchronous machine having 4 poles and 30 armature slots. Make a scheme of the winding, showing the connections between the coil groups and the starts and finishes of the phases, for the two cases of ; i) single layer with end connections arranged in two planes ; ii) double layer winding with a coil span of 6 slot pitches.

Calculate in each case the Winding factor.

سبق حل هذه المسألة بالنسبة لعمل التخطيط للملفات مفردة الطبقة ، كما هو مطلوب فى (i) ، وايضاح التوصيلات بين مجموعات الملفات فى المراحل المختلفة ، كما جاء فى شكل (٢٠ — ١ ب) ، وذلك بمساعده مخطط نجمة المجارى فى شكل (٢٠ — ١ أ) . بالنسبة لما هو مطلوب فى (ii) نقوم أولا بترتيب جوانب الملفات فى الطبقة العلوية بنفس الطريقة التى اتبعت فى (i) ، كما سبق ذكره فى الباب الأول بالاشارة إلى شكلى (٢٢ — ١ أ ، ب) ، ثم ترتب جوانب الطبقة السفلية على نفس النمط ، ابتداء من المجرى رقم 7 (لكى يكون اتساع الملف 6 مجارى كما هو مطلوب) ، وذلك كما فعلنا فى الشكلين المذكورين . غاية ما فى الأمر أن ترتيب جوانب الملفات فى الطبقة العلوية يختلف اختلافا طفيفا عما جاء فى شكل (٢٠ — ١ ب) ، حيث كانت مجموعات الملفات تحتوى على أعداد مختلفة من الملفات ، هى كما جاء فى هذا الشكل 3 — 3 — 2 — 2 — 3 — 3 — 2 — 2 — 3 — 3 — 2 — 2 ، وقد كان هذا ضروريا لكى يمكن تنفيذ الملف ، بينما يمكننا فى حالة الملف مزدوج الطبقة جعل مجموعات الملفات فى الطبقة العلوية تحتوى على أعداد من الملفات ، هى بالترتب 2 — 3 — 2 — 3 — 2 — 3 — 2 — 3 — 2 — 3 — 2 — 3 فيكون الملف أكثر تماثلا . ويكون ترتيب مجموعات الملفات فى الطبقة السفلية على نفس الوتيرة ، بطبيعة الحال ، مع الابتداء فى المجرى رقم 7 ، كما حدث فى الحالة السابقة بالضبط .

بالنسبة لحساب معامل الملف : (أولا) فى حالة الملف مفرد الطبقة ، وكذلك فى حالة الملف مزدوج الطبقة يحسب معامل التوزيع k_d على أساس $q'=b$ ، كما سبق شرحه فى الباب الثانى حيث :

$$q = \frac{30}{3 \times 4} = \frac{5}{2} = \frac{b}{C} \quad , \quad q' = b = 5$$

$$\alpha' = \frac{360\ p}{q' \times 3 \times 4} = \frac{360 \times 2}{5 \times 3 \times 4} = 12^\circ$$

$$k_w = \frac{\sin \frac{q'\alpha'}{2}}{q' \sin \frac{\alpha'}{2}} = \frac{\sin 30}{5 \sin 6} = 0.956$$

بالنسبه للتوافقيه الفراغيه ذات الدرجة γ نجد أن :

$$k_{w\gamma} = \frac{\sin \frac{q'\alpha'\gamma}{2}}{q' \sin \frac{\alpha'\gamma}{2}}$$

(ثانيا) بالنسبة للف مفرد الطبقة نجد أن اتساع الملفات يختلف مابين 7 مجارى و 8 مجارى ، كما يتضح من شكل (٢٠ — ١ب) ، فاذا اعتبرنا أن الخطوة القطبية تسع 7.5 ($= 2.5 \times 3$) مجرى ، فان هذا يعنى أن اتساع الملف يقل أو يزيد بمقدار نصف مجرى عن الخطوة القطبية ، وهذا يؤدى إلى إعطاء معامل وترى بزاوية تقصير θ تساوى الزاوية المكافئة لنصف المجرى ، أى أن :

$$k_c = \cos \frac{\theta}{2} = \cos \frac{\alpha}{4} = \cos \frac{360 \times 2}{30 \times 4} = 0.9945$$

$$k_w = k_d \cdot k_c = 0.956 \times 0.9945 = 0.95$$

(ثالثا) بالنسبة للف مزدوج الطبقة نجد أن θ_1 تنتج باستخدام المعادلة (٤—٢) ، حيث :

$$y = 6 \quad , \quad 3q = 7.5 \quad , \quad \theta = \frac{1.5}{7.5} \times 180 = 36^\circ$$

$k_c = \cos 18 = 0.9511$

$k_w = k_d \times k_c = 0.956 \times 0.9511 = 0.91$

وتكون $k_{c\gamma} = \cos \gamma \dfrac{\theta}{2}$ فى الحالتين .

(4) The flux density distribution curve in the air gap of a 50 c/s 3—phase synchronous generator is :
$B = 11.5 \sin \theta + 2.5 \sin 3\theta - 2 \sin 5\theta - 1.5 \sin 7\theta$ kilo gauss where θ is measured from the neutral axis. The pole pitch is 40 cms and core length 34 cms. The machine has 12 slots per pole each containing 6 conductors. The Winding is double layer, with a phase spread of 60 degrees, and each coil spaus 120 degrees If the generator is driven at a speed of 750 r.p.m., determine the equation of the e.m.f. induced in each phase and its effective Value.

من معادلة منحنى كثافة الخطوط المغناطيسية فى الثغرة الهوائية نجد أن :

$B_1 = 11500$, $B_3 = 2500$, $B_5 = -2000$,
$B_7 = 1500$ gauss

$$p = \frac{60 \times 50}{750} = 4 \quad , \quad 2p = 8 \quad , \quad S = 12 \times 8 = 96$$

$$\alpha = \frac{360 \times 4}{96} = 15^\circ \quad , \quad \theta = 180 - 120 = 60^\circ$$

يكون اتساع الملف 8 مجارى ، ونظراً لأن زاوية الانتشار المرحلى 60 درجة نجد أن :

$$T_{ph} = \frac{96 \times 6}{6} = 96 \quad , \quad q = \frac{12}{3} = 4$$

باستخدام المعادلات (١١ — ٢) و (١٢ — ٢) و (١٣ — ٢) نجد أن :

$$k_{d1} = \frac{\sin 30}{4 \sin 7.5} = 0.957 \quad , \quad k_{c1} = \cos 30 = 0.866$$

$$k_{d3} = \frac{\sin 3 \times 30}{4 \sin 3 \times 7.5} = 0.653 \quad , \quad k_{c3} = \cos 3 \times 30 = 0$$

وهذا يعنى اختفاء التوافقية الثالثة من منحنى الضغط بسبب تقصير اتساع الملف بالزاوية 60 = θ مما أدى إلى حصولنا على 90 = $\frac{n \times 60}{2}$ بحيث تكون قيمة 3 = n . ويمكن توصيل المراحل دلتا فى هذه الحالة ، دون الخوف من من مرور تيار تيار قصر داخل الدلتا . ولعل هذا هو السبب فى تقصير اتساع الملفات على هذا النحو .

$$k_{d5} = \frac{\sin 5 \times 30}{4 \sin 5 \times 7.5} = 0.205 \quad ,$$

$$k_{c5} = \cos 5 \times 30 = -0.866$$

$$k_{d7} = \frac{\sin 7 \times 30}{4 \sin 7 \times 7.5} = -0.1572 \quad ,$$

$$k_{c7} = \cos 7 \times 30 = -0.866$$

$$\phi_1 = 11500 \times 34 \times 40 \times \frac{2}{\pi} = 9.95 \times 10^6 \text{ lines}$$

$$\phi_5 = -2000 \times 34 \times \frac{40}{7} \times \frac{2}{\pi} = -0.577 \times 10^6 \text{ lines}$$

$$\phi_7 = -1500 \times 34 \times \frac{40}{7} \times \frac{2}{\pi} = -0.186 \times 10^6 \text{ lines}$$

$$f_1 = 50 \;,\; f_5 = 250 \;,\; f_7 = 350 \;\; c/s$$

$$E_1 = 4.44 \times 50 \times 96 \times 9.95 \times 10^6 \times 0.957 \times 0.866 \times 10^{-8} = 1760 \; V$$

$$E_5 = 4.44 \times 250 \times 96 \times -0.577 \times 10^6 \times 0.205 \times -0.866 \times 10^{-8} = 109 \; V$$

$$E_7 = 4.44 \times 350 \times 96 \times -0.186 \times 10^6 \times -0.1572 \times -0.866 \times 10^{-8} = -37.7 \; V$$

وتكون معادلة الضغط المرحلى ، كدالة للزمن t بالنسبه للمرحله الاولى ، بتطبيق المعادله (١٧ — ٢) هى :

$$e_1 = \sqrt{2}\,E_1 \sin \omega t + \sqrt{2}\,E_3 \sin 3\omega t + \sqrt{2}\,E_5 \sin 5\omega t + \sqrt{2}\,E_7 \sin 7\omega t$$

حيث $E_3 = 0 \;,\; 2\pi f_1 \omega = 314$

$$e_1 = 2485 \sin 314\,t + 154 \sin 1570\,t - 53.3 \sin 2198\,t \; V$$

لكى نحصل على e_2 نضع $(\omega t - 120)$ بدلا من ωt فى معادلة e_1 ولكى نحصل على e_3 نضع $(\omega t - 240)$ أو $(\omega t + 120)$ بدلا من ωt فى معادلة e_1 ونحصل على القيمة الفعاله للضغط المرحلى من المعادله :

$$E_{ph} = \sqrt{E^2_1 + E^2_3 + E^2_5 + E^2_7} \backsimeq 1726 \; V$$

مسائل على البابين الاول والثانى

1 — Draw the single layer Winding arrangements, with the overhangs arranged in two or three endplanes, as would be necessary, for the following 3 — phase alternating current machine stators, with phase spread of 60°.

a — $q = 3$, $2p = 6$

b — $q = 2$, $2p = 10$

c — $q = 2\frac{1}{4}$, $2p = 8$

d — $q = 2\frac{2}{5}$, $2p = 20$

e — $q = 2\frac{1}{8}$, $2p = 16$

Calculate the winding factor in each case and indicate the starts and finishes of the 3 phases.

2 — Draw the double layer lattice winding arrangements for the following 3 — phase alternating current machine stators :

a — $q = 3$, $2p = 4$, phase spread 120^0 and full pitch coils

b — $q = 3$, $2p = 4$, phase spread 60^0 with chording $\frac{1}{3}$ of the pole pitch

c — $q = 2\frac{1}{2}$, $2p = 4$, phase spread 60^0 with coil span of 6 slots.

Calculate the winding factor in each case and indicate the stars and finishes of the 3 phases.

3 — Calculate the coil span factor & distribution factor for a 3 phase machine with 21 slots per pole, the winding of which is double layer with 2 conductors per slot & is chorded by 2 slots.

4 — A 3 phase, star connected, 12 pole, 50 cycle/second alternator has 12 slots per pole & 4 conduetors per slot.

The coils are short chorded by one slot & all the coils of a phase are connected in series. The fundamental flux per pole is 10×10^6 and there is also a 20 % 3 rd harmonic & 10 % fifth harmonic.

Determine the R. M. S. V. of the total o. m. f. & of fundamental, 3 rd and 5 th. barmonics components both in phase & line.

5 — The stator of an alternator has 6 alots/pole pitch & is wound either as : a – single phase machine with winding occupying 4 slots/pole pitch only. b — or single phase machine with the winding occupying all slots. c — or two phase machine. d — or 3 phase machine.

Find the spread factor of the winding in each ease. Compare the rating of the machines & the oopper used for different kinds of the winding. Assume the same current in each case & take the 3 phase as 100%.

6 – The flux distribution in the air gap of a 50 cycle/second salient pole alternator may be taken as rectangular, the base being 2/3 of the pole pitch. Calculate the R. M. S. V. of the fundamental phase e. m. f. The following particulars are given : 20 pole 12 slots/pole, 3 conductors/slot, phase spread 60°, pole pitch 50, stator length 75 cms., max. flux denisty in air gap 7000 lines/cm². Find also the phase e. m. f. if the total same flux had a sinusoidal distribution.

7 — The flux density in the air — gap of a 3 — phase 4 — pole alternator varies circumferentially according to the following expression

$$B_\theta = B_1 \sin \theta - B_5 \sin 5\theta - B_7 \sin 7\theta$$

where $B_1 = 0.7 \, wb/m^2$, $B_5 = \frac{1}{5} B_1$, and $B_7 = \frac{1}{7} B_1$,

and θ from 0 to 2π covers the double pole—pitch

There are 2 slots per pole per phase and the armature coils are short — chorded one slot pitch. The effective length of conductor is 0.5 m and the peripheral sreed of the rotor is 50 m/sec. Each coil has 10 turns. Determine the relative amplitudes of the fundamental and harmonics is the generated phase e. m. f..

8 — An 8 — pole, three - phase, 50 — c/s alternator has four slots per pole per phase. The winding is of single - layer full — span coils, and there are 12 turns per coil. The coils of each phase are connected in series to form the phase winding. The air — gap flux density is distributed circumferentially according to the expression :

$$B_\theta = B_1 [\sin 5\theta - 0.15 \sin 7\theta],$$

π representing the full pole—pitch. The fundamental flux per pole is 0.025 wb. calculate the r. m. s. phase voltage of : (a) the fundamental, (b) the fifth harmonic and (c) the seventh harmonic. Prove any formula used for the winding factor.

9 — The phase voltage of a 750 KW, 2200 V, 3 - phase 50 cycles alternator has a 5% third — harmonic.

what is the circulating current on normal voltage, if the machine is mesh — connected? The resistance and reactance per phase are 0.25 Ω and 0.7 Ω respectively. Express the loss due to the circulating current as a percentage of full — load output.

10 — show that when a 3 — phase alternator is star — connected no electromotive force of triple frequency or multiple thereof appears in the line voltage. If the phase voltage of a star — connected, 3 — phase alter — nator contains a fundamental of 200 V amplitude, and 3 rd, 5 th, 7 th, and 9 th order harmonics of 40 — 25 — 20 and 10 — Vamplitude respectively, calculate the ratio of line to phase voltag.

11 — The wave — form of the phase voltage of a 3 — phase, star — connected alternator is as follows :

Time – angle, deg	0	18	36	54	72	90	108	126
voltage, V	0	700	750	780	1250	1600	1250	730

Draw the line — voltage wave and obtain the value of its 5 th harmonic.

12 — The phase — e. m. f. wave of a 3 — phase alternator consists of a fundamental and a 30 % third harmonic. If the amplitude of the fundamental is 3 100 V, calculate the r.m.s. value of the line voltage when the windings are connected (a) in star, (b) in mesh If the leakage reactance of each phase is 10.0 Ω at 50 cycles, determine (c) the circulating current in case (b) Neglect resistance.

13 — A 16 — pole, 3 — phase alternator has 144 slots. The winding is short — chorded by 1 slot — pitch and star — connected. Assuming a field form of $100 \sin\theta + 25 \sin 3\theta + 20 \sin 5\theta$, find the harmonics in (a) the phase voltage, (b) the line voltage, as a percentage of the fundamental. Determine also the phase and line R.M.S. values as a percentege of the fundam — ental.

الباب الثالث

رد فعل المنتج ومعامل التنظيم فى الآلات المتزامنة

Armature reaction and Voltage regulation in synchronous Machines

أولا ـ رد فعل المنتج والمجال المغناطيسى الدائر

(Armature reaction and rotating magnetic field)

المجال المغناطيسى الناشىء عن ملفات المنتج الثلاثية المراحل :

يؤدى مرور التيارات المرحلية فى ملفات المنتج إلى ظهور تأثيرات مغناطيسية حولها ، هى ما اصطلح على تسميته برد فعل المنتج ، كما سبق شرحه بالتفصيل، بالنسبة لآلات التيار المستمر، فى الباب السادس من كتاب هندسة الآلات الكهربية. وسوف نتبع ، فى سبيل الحصول على توزيع المجال المغناطيسى الناشىء عن ملفات المنتج فى الآلات المتزامنة ، نفس الوسيلة التى اتبعناها فى هذا الباب ، من حيث تحديد التيارات ، المارة فى الموصلات التى تحتوى عليها هذه الملفات ، فى القيمة والاتجاه، ورسم خطوط القوى المغناطيسية التى تنشأ بناء على ذلك فى الثغرة الهوائية. وما يتصل بها من مسارات ، ثم الحصول على المجال المغناطيسى المحصل فى هذه الثغرة على هذا الأساس . ولكن يجب أن نراعى أن حالة الآلات المتزامنة تختلف عن حالة آلات التيار المستمر ، فى هذا المضمار ، من ناحيتين جوهريتين، وهما :

١ ـ أن الملفات فى حالة الآلات المتزامنة تنقسم إلى ثلاث مراحل ذات

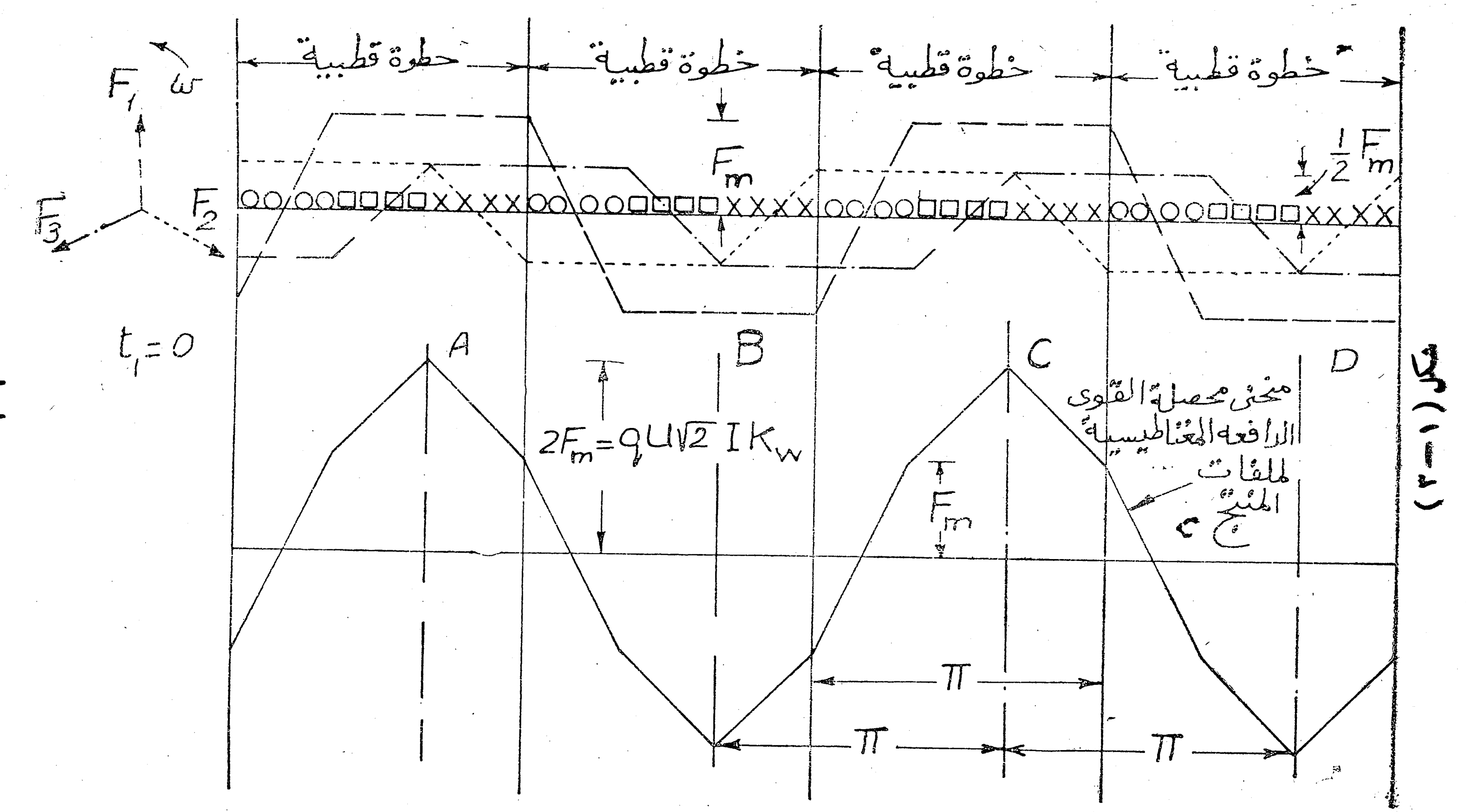
أوضاع معينة فى الفراغ بالنسبة لبعضها البعض ، أو بمعنى أصح ذات توزيع فراغى معين ، حيث يوجد بين كل مرحلتين متعاقبتين اختلاف مرحلى فراغى (space phase difference) مقداره 120 درجة كهربيه . وهذا يستدعى منا استعراض المجال المغناطيسى للملفات بأكملها حتى نقف على حقيقة ما يجرى فى حالة الآلات المتزامنه ، بينما استطعنا الحصول على كل النتائج التى تعنينا، فى حالة آلات التيار المستمر، بدراسة ما يحدث فى قطاع واحد من القطاعات المتماثلة فى الآله تحت قطبين متجاورين .

٣ — أن التيارات المارة فى الملفات ثلاثية المراحل هى الأخرى ثلاثية المراحل ويوجد بين كل اثنين منها اختلاف مرحلى زمنى (Time phase difference) يناظر 120 درجة كهربيه . وهذه التيارات مترددة تتغير من لحظة لأخرى بصورة دورية ، أى أنها دوال للزمن . لذلك يجب أن نراعى تحديد اللحظة التى نستعرض فيها شكل وقيمة المجال المغناطيسى ، وأن نفعل ذلك فى لحظات مختلفة، حتى نستطيع أن نعرف كيف يتغير هذا المجال ، تبعا لتغير التيارات مع الزمن .

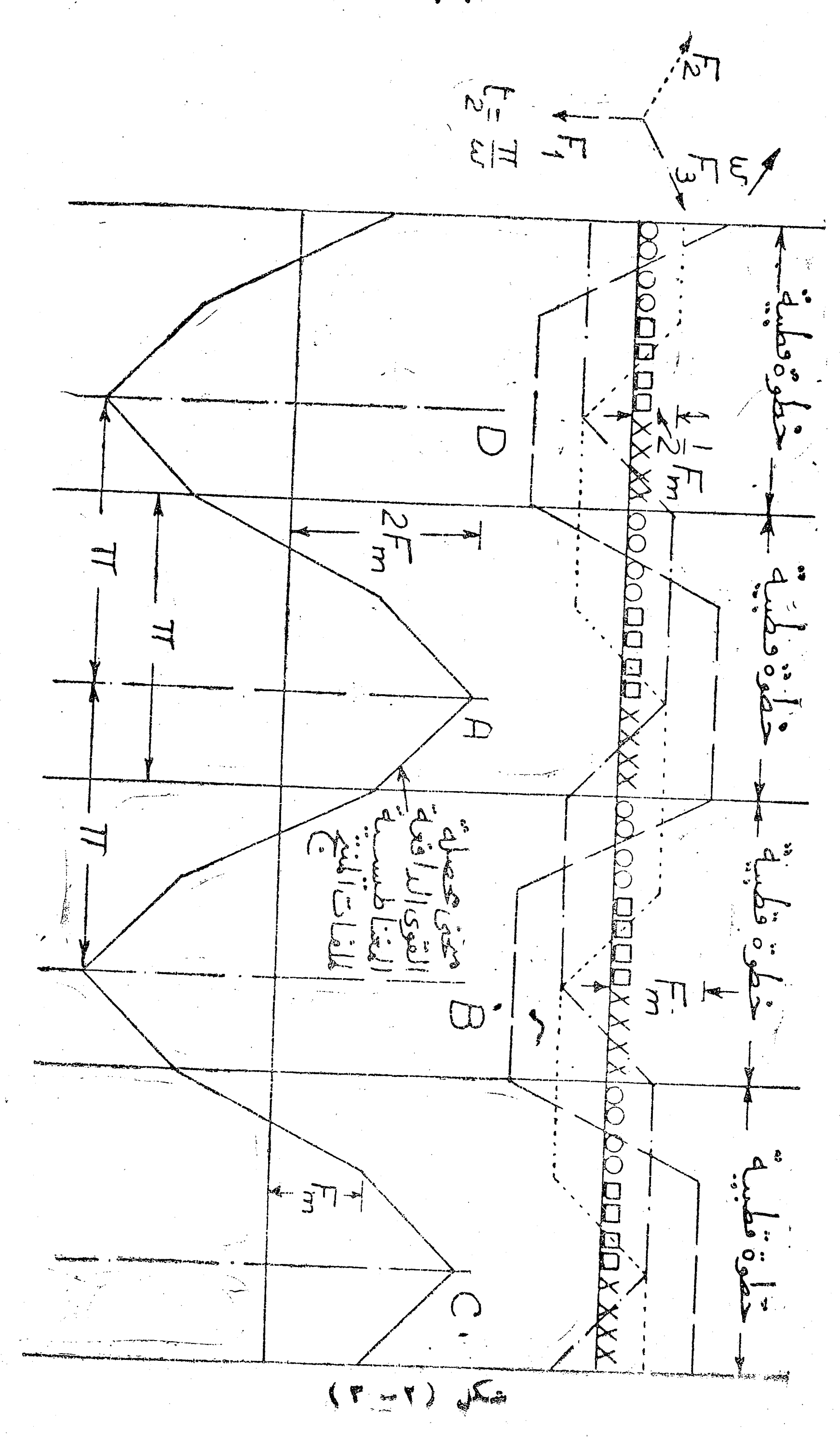
يبين شكل (١ — ٣) المجالات المغناطيسية حول جوانب الملفات فى الآلة المتزامنة ، وهى مرسومة بنفس الطريقة التى اتبعت فى رسم شكلى (١ — ٦) ، (٢ — ٩) فى كتاب هندسة الآلات الكهربية ، آلات التيار المستمر (ص ٢٩١ — ص ٢٩٥) ، مع اعتبار أن اللحظة التى يتم فيها تحديد شكل المجال المغناطيسى هى تلك التى تكون فيها قيمة التيار فى المرحلة الأولى فى نهايتها العظمى الموجبة . فاذا كانت القيمة الفعالة للتيار المرحلى هى I أمبير ، وعدد الموصلات فى كل مجرى من مجارى المنتج هو u ، وعدد المجارى لكل مرحلة تحت كل قطب هو q ،

نجد أن القوة الدافعة المغناطيسية لمجموعة الملفات التي عددها q في المرحلة الأولى ، وهي التي تقع أمام قطبين مختلفين ومتتالين ، يكون مقدارها $\frac{I_c Z}{4p}$ أمبيرلفة لكل قطب ، وهي تناظر القيمة $q \frac{U}{2} \times \sqrt{2}\, I$ في شكلي (١ — ٦) ، (٢ — ٦) ، التي سبقت الاشارة اليها . هذا على أساس أن القوة الدافعة المغناطيسية ، الناشئة عن الملفات الموزعة في q من المجاري المتجاورة ، تساوي تلك التي نحصل عليها باعتبار الموصلات في مجرى واحد مضروبة في عدد المجاري q . فاذا راعينا أن القوة الدافعة المغناطيسية مقدار موجه (Vector quantity) مثل القوة الدافعة الكهربية تماما ، نجد أنه يجب علينا استخدام نفس معامل التصحيح ، وهو معامل اللف k_w ، الذي استخدمناه في معادلة القوة الدافعة الكهربية المرحلية ، في تعيين قيمة القوة الدافعة المغناطيسية لمجموعة الملفات q لكل قطب ، فتصبح $q \frac{u}{2} \times \sqrt{2}\, Ik_w$. وهذه هي القيمة F_m بالأمبير لفات ، التي يمثلها كل من المتجهات F_1 , F_2 , F_3 في شكل (١ — ٣) ، وهي عبارة عن قيمة النهاية العظمى للقوة الدافعة المغناطيسية بالأمبير لفات لكل قطب التي تعطيها مجموعة ملفات المرحلة الواحدة تحت كل قطبين متتاليين ومختلفين في القطبية ، في اتجاه محور هذه الملفات ، في اللحظة التي تكون قيمة القوة الدافعة المغناطيسية لنفس المجموعة من الملفات عند أية لحظة أخرى t مقاسة من هذه اللحظة هي $F_m \cos \omega t$. ولذلك فان القيمة اللحظية لكل من المتجهين F_2 , F_3 هي $F_m \cos 120 = -\frac{F_m}{2}$ في اللحظة التي تكون فيها القيمة اللحظية لـ F_1 هي F_m ، كما هو مبين في شكل (١ — ٣) .

تبين الدوائر الصغيرة في شكل (١ — ٣) المجاري الخاصة بالمرحلة الأولى ،


خطوة قطبية
خطوة قطبية
خطوة قطبية
خطوة قطبية
F_1
F_2
F_3
ω
F_m
$\frac{1}{2} F_m$
$t_1 = 0$
A
B
C
D
$2F_m = qU\sqrt{2}\, I K_w$
F_m
π
π
π
منحنى محصلة القوى الرافعة المغناطيسية للملفات المنتج

شكل (١ - ٣)



خطوة قطبية
خطوة قطبية
خطوة قطبية
خطوة قطبية
خطوة قطبية
ω
F_1
F_2
F_3
$t=\frac{\pi}{2\omega}$
$\frac{1}{2}F_m$
F_m
$2F_m$
F_m
A
B
C
D
π
π
π

شكل (٢-٣)

والمربعات الصغيرة المجارى الخاصة بالمرحلة الثانية ، وعلامات × المجارى الخاصة بالمرحلة الثالثة ، والشكل لآلة ذات أربعة أقطاب ، وأربعة مجارى لكل مرحلة تحت كل قطب . وتبين الخطوط المتقطعة منحنيات القوة الدافعة المغناطيسية لملفات المراحل الثلاث فى اللحظة المفروضة ، بينما يبين الخط المتصل محصلة هذه المنحنيات عند نفس اللحظة ، ونحصل عليها بجمع الاحداثيات الرأسية للمنحنيات عند النقط المختلفة حول سطح المنتج .

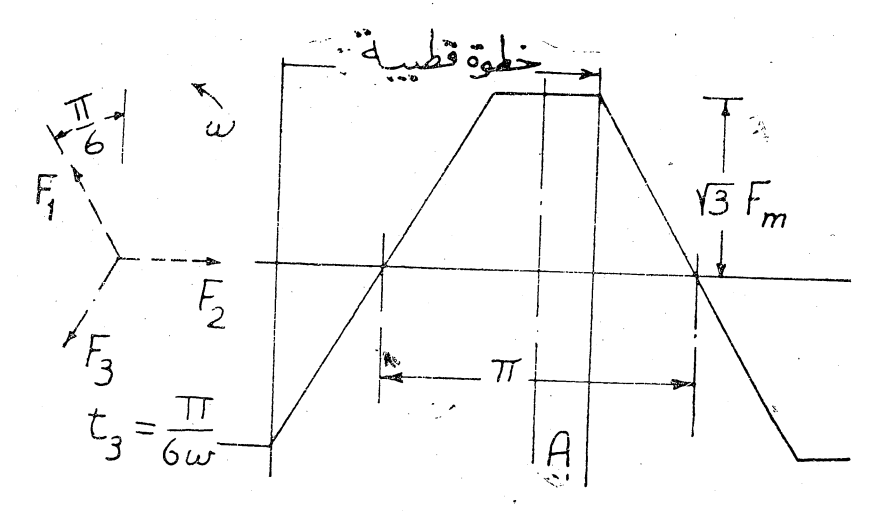
يبين شكل (٢ — ٣) منحنيات القوة الدافعة المغناطيسية لملفات المراحل الثلاث ومحصلتها فى لحظة t ، تالية للحظة السابقة المرسوم عندها شكل (١ — ٣) حيث $\omega t = \pi$. تكون القيمة اللحظية المتجه F_1 فى هذه الحـالة هى $F_m \cos \pi = - F_m$ والقيمة اللحظية للمتجه F_2 هى $F_m \cos\left(\pi - \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{F_m}{2}$ والقيمه اللحظية للمتجه F_3 هى $F_m \cos\left(\pi + \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{F_m}{2}$ ، وتتبع فى رسم هذا الشكل نفس القواعد التى اتبعت فى رسم الشكل (١ — ٣) بالضبط .

بدراسة ومقارنة الشكلين (١ — ٣) ، (٢ — ٣) نخرج بالنتائج الآتية :

١ — يكون منحنى محصلة القوى الدافعة المغناطيسية لملفات المراحل الثلاث على المنتج ذا شكل منتظم ، بحيث يمكننا اعتبار وجود مجموعة من الأقطاب المكافئة A , B , C , D عددها يساوى عدد أقطاب الآلة 2p (أربعة فى المثال المعطى) ، ويحمل كل منها ملفات تنبيه تعطى قوة دافعة مغناطيسية مقدارها $2F_m$ عند محور كل قطب ، وتتغير على مدى الخطوة القطبية تبعا لشكل المنحنى الذى نحصل عليه ، والذى يمكن تحديد معادلته بسهولة من الرسم . هذا ويجب ملاحظة أنه على الرغم من أننا قد حصلنا على نفس الشكل المنحنى عند اللحظتين

$t_1 = 0$ ، $t_2 = \frac{\pi}{\omega}$ ، إلا أن شكل المنحنى يختلف عن ذلك فى لحظات أخرى.

فاذا اعتبرنا مثلا اللحظة $t_3 = \frac{\pi}{6\omega}$ ، ورسمنا المنحنى باتبـاع نفس الطريقة السابقة، نحصل على الشكل المبين فى شكل (٣—٣). إلا أنه قد تبين أن تحليل



شكل (٣ — ٣)

فورير المتوالى، للمنحنيات المختلفة التى يمكن أن نحصل عليها فى اللحظات المتباينة، يعطى توافقية أساسية ذات اتساع واحد فى جميع هذه المنحنيات ، نرمز له بالرمز F_A أمبير لفة لكل قطب ، حيث :

$$F_A = \frac{3}{\pi} F_m = \frac{3}{\pi} \times \frac{\sqrt{2}}{2} quIk_w = 1{,}35\ quIk_w \quad \cdot\cdot (١ — ٣)$$

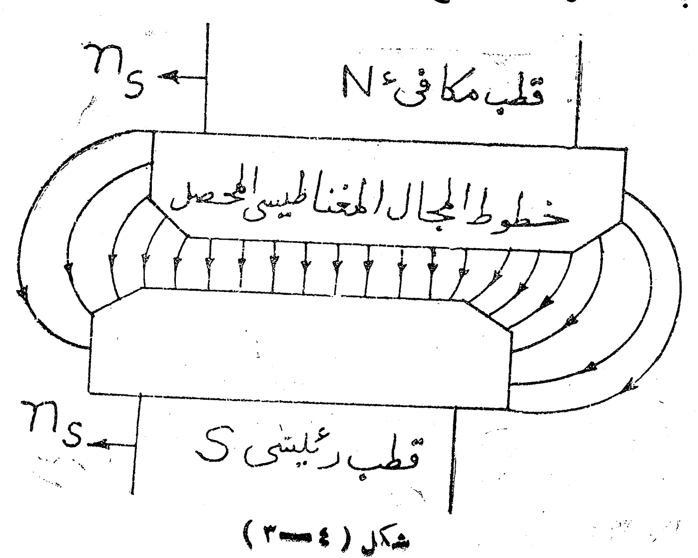
فاذا عوضنا عن qu بما يساويها بالنسبة لعدد اللفات فى كل مرحلة T_{ph} ، حيث $T_{ph} = qup$ نجد أن :

$$F_A = 1\ 35\ \frac{T_{ph}}{p}\ Ik_w \quad \text{أمبير لفة/قطب} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (٢ — ٣)$$

ويعطى منحنى محصلة القوى الدافعة المغناطيسية لملفات المنتج ، الذى حصلنا عليه فى الأشكال (١ — ٣) ، (٢ — ٣) ، (٣ — ٣) ، توزيع هذه المحصلة على مدى الخطوة القطبية للمولد . أى أنه يعطى التوزيع الفراغى (space distribution) للمحصلة ، وذلك عندما يمر فى الملفات ثلاثية المراحل تيارات ثلاثيـة المراحـل مترددة ، تتغير مع الزمن على منحنيات جيبية (sine curves) . ويحتوى منحنى التوزيع الفراغى لمحصلة القوى الدافعه المغناطيسية لملفات المنتج فى هذه الحالة على توافقية أساسية وتوافقيات جيبية مفردة الدرجات (odd sine harmonics) ، لأن المنحنى متماثل حول نقطة الأصل . ويطلق على هذه التوافقيات جميعها اسم التوافقيـات الفراغيـة لمنحنى محصـلة القوة الدافعـة المغنـاطيسية لملفـات المنتج .(space harmonics in the M.M.F. wave of armature reaction) لذلك يمكننا أن نقول بناء على كل ماسبق أن F_A ، المعطـاة قيمتهـا بالمعـادلتين (١ — ٣) ، (٢ — ٣) ، هى اتساع التوافقية الفراغية الأساسية لرد فعل المنتج ، بفرض أن التيارات جيبية (sinusoidal) فاذا اعتبرنا أن AT_A هى القيمة المكافئة لرد فعل المنتج بالأمبير لفات لكل قطب ، نكون بذلك قد أهملنا التوافقيات الفراغية غير الأساسية فى منحنى محصلة القوى الدافعة المغناطيسية ، وأهملنا التوافقيات الزمنية غـير الأسـاسية (time harmonics) ، فى منحنى التيـار (باعتبار أن المنحنى الجيبى للتيار هو عبارة عن التوافقية الأساسية) . وتستخدم F_A فعلا على هذا الأساس فى حسابات رد فعل المنتج فى الآلات المتزامنة (والآلات التأثيرية أيضا) ، حيث F_A تساوى AT_A عدديا.

٢ — تؤدى التغييرات التى تحدث فى التيارات المرحلية ، نتيجة لمرور زمن مقداره $t_2 = \frac{\pi}{\omega}$ ، إلى إزاحة محاور الأقطاب المكافئة A , B , C , D ،

التى يتمثل فيها رد فعل المنتج ، زاوية محددة حول محيط المنتج مقدارها π درجة كهربية . فاذا حسبنا سرعة إزاحة هذه الأقطاب على هذا الأساس ، نجد أنها عبارة عن $\omega = \frac{\pi}{t_2}$ ، وهى السرعه الزاوية المناظرة لسرعة التزامن n_s ، حيث $\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{p\,n_s}{60}$ (هندسة الآلات الكهربية ، المبادىء الأساسية ص ١٣٦ ، ١٣٧) . وهذا ، بالإضافة إلى ماسبق بيانه فى 1 ، يعنى أننا نستطيع أن نعتبر أن ردفعل المنتج ناشىء عن مجموعة من الأقطاب المكافئة، عددها يساوى عدد أقطاب الآلة $2p$ ، وتدور هذه الأقطاب المكافئة، فى نفس الإتجاه الذى يدور فيه العضو الدائر ، بنفس سرعة التزامن n_s لفة فى الدقيقة . بينما يحمل كل قطب منها ملفات تنبيه ، مكافئة أيضا ، ذات توزيع فراغى للقوة الدافعة المغناطيسية ينطبق على التوافقية الفراغية الأساسية لمنحنى محصلة القوه الدافعة المغناطيسية للملفات المنتج ، المبين فى كل من شكلى (١ — ٣) ، (٢ — ٣) . بذلك نجد أن مجموعة الأقطاب المكافئة لرد فعل المنتج هذه تدور بنفس سرعة التزامن مع الأقطاب



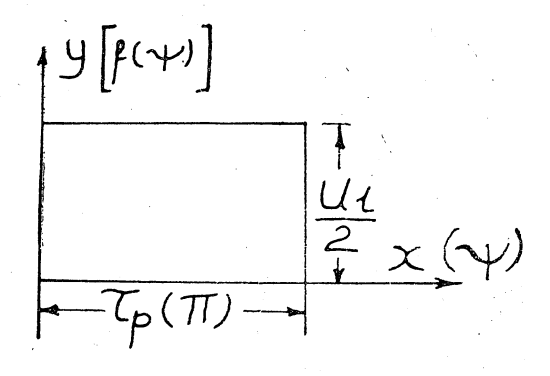
شكل (٤ — ٣)

الرئيسية على العضو الدائر . ولا شك أن كل قطب من الأقطاب المكافئة يواجه، أو يترابط مع (locks With) ،قطب مخالف له فى القطبية من مجموعة الأقطاب الرئيسية . ويتم هذا الترابط بوساطة خطوط القوى المغناطيسية التى تخرج من أحدهما وتدخل فى الآخر (لإختلافها فى القطبية) ، كما هو مبين فى شكل (٤ — ٣) . وهذه الخطوط ذات طبيعة مرنة أومطاطة (elastic lines) يمكن بالتعويل عليها تفسير بعض الظواهر الخاصة بالآلات المتزامنة ، مثل ظـــاهرة التأرجح (Hunting or oscillations) ، وغيرها من الظواهر التى تدخل فى موضوع اتزان (stability) هذه الآلات . وتتحدد كثافة هذه الخطوط وتوزيعها ، عند النقط المختلفة فى الثغرة الهوائية للآلة ، على حسب القوة الدافعة المغناطيسية المحصلة التى تنتج من جمع القوة الدافعة المغناطيسية لملفات التنبيه على القطب الرئيسى ، ومحصلة القوى الدافعة المغناطيسية لملفات المنتج عند كل نقطة ، جمعاً إتجاهياً (vector addition) . ونكتفى فى بعض الحالات عند إجراء هذا الجمع بأن نأخذ فى الاعتبار التوافقية الفراغية الأساسية فى كل من منحنى التوزيع الفراغى للقوة الدافعة المغناطيسية على القطب الرئيسى المبين فى شكل (٥ — ٢) أو (٦ — ٢)، ومنحنى محصلة القوى الدافعة المغناطيسية لملفات المنتج المبين فى شكل (١ — ٣) أو (٢ — ٣) ، وذلك للحصول على منحنى توزيع فراغى جيبى الشكل ، على مدى الخطوة القطبية فى الثغرة الهوائيه ، للقوة الدافعة المغناطيسية المحصلة فاذا كانت أبعاد الثغرة الهوائية مهيأة على أساس الحصول على توزيع جيبى الشكل لكثافة الخطوط المغناطيسية على مدى الخطوة القطبية فى هذه الثغرة، فاننا نحصل، بناء على التقريب السابق إجراءه ،على قوة دافعة كهربية تعطيناضغطاً طرفياً للآله ذا شكل جيبى ، وذلك عند الحمل الكامل .

التوافقيات الفراغية وعلاقتها بتوافقيات منحنى التيار :

لكى نحصل على صورة واضحة ، وعلاقات رياضية ثابتة ، لجميع الحقائق السابق ذكرها ، بالنسبة للتوافقيات الفراغية وما يتصل بها ، سوف نقوم فيما يلى بتناول الموضوع من الناحية الرياضية ، وتحليل النتائج التى نحصل عليها لمقارنتها بالنتائج السابقة .

نبدأ بفرض أن المنتج يحتوى على مرحلة واحدة من الملفات ، وبجرى واحد لهذه المرحلة ، تحت كل قطب من أقطاب الآلة ، يحتوى كالمعتاد على u من الموصلات ، وأن التيار المار فى هذه الموصلات ، وهو تيار مفرد المرحلة (single phase current) ذو قيمة فعالة I ، ويتغير على منحنى جيبى بحيث تكون قيمته اللحظية (instantaneous value) عند أية لحظة t هى $i = \sqrt{2}\, I \sin \omega t$ ، أى أن منحنى التيار يحتوى على التوافقية الأساسية فقط . يكون منحنى التوزيع الفراغى للقوة الدافعة المغناطيسية لملفات المنتج على مدى الخطوة القطبية τ_p ، عند اللحظة t عبارة عن مستطيل ارتفاعه $\frac{ui}{2}$ أمبير لفة لكل قطب ، كما هو مبين فى شكل (٥ — ٣) .



شكل (٥ — ٣)

نحصل على تحليل فورير المتوالى لهذا المنحنى بالطريقة العادية ، وهو يتكون من جيوب فردية ، لأن المنحنى متماثل حول نقطة الاصل ، فنجد أن :

$$y = F_1 \sin \frac{\pi x}{\tau_p} + F_3 \sin 3 \frac{\pi x}{\tau_p} + \cdots\cdots$$

$$= \sum_{\gamma = 1,3,5,\ldots} F_\gamma \sin \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (٣—٣)$$

بوضع $\psi = \frac{\pi x}{\tau_p}$ ، تصبح $f(\psi) = y = \frac{ui}{2}$ ، من $\psi = 0$ الى $\psi = \tau_p$ ، فيكون :

$$F_\gamma = \frac{2}{\pi} \int_0^{\tau_p} \frac{ui}{2} \sin \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} \, d\left(\frac{\pi x}{\tau_p}\right)$$

$$= -\frac{2}{\gamma\pi} \cdot \frac{ui}{2} \left[\cos \gamma\pi - 1 \right] = \frac{2}{\gamma\pi} ui \quad \cdots \quad (٣—٤)$$

ذلك لأن γ عدد صحيح فردى ، بحيث تكون $\cos \gamma\pi$ تساوى صفراً دائما .

بالتعويض عن F_γ من المعادلة (٤—٣) فى المعادلة (٣—٣) ووضع $i = \sqrt{2}\, I \sin \omega t$:

$$y = \frac{\sqrt{2}}{\pi} uI \sum_{\gamma = 1,3,5,\ldots} \frac{1}{\gamma} \left[\cos\left(\omega t - \gamma \frac{\pi x}{\tau_p}\right) - \cos\left(\omega t + \gamma \frac{\pi x}{\tau_p}\right)\right] \cdots\cdots \quad (٣—٥)$$

تعطى المعادلة (٥—٣) التوافقية الفراغية الأساسية ، والتوافقيات الفراغية العالية (space fundamental and higher space harmonics) ، فى منحنى التوزيع الفراغى (أو المنحنى الفراغى) للقوة الدافعة المغناطيسية لملفات المنتج

أحادية المراحل ، وذلك عندما يمر فيها تيار مفرد المرحلة ، ذو منحنى زمنى جيبى الشكل (time curve) ، أو بمعنى آخر عندما يحتوى المنحنى الزمنى للتيار المار فى الملفات على توافقية زمنية أساسية (time fundamental) ، ولا يحتوى على أية توافقيات زمنية عالية (higher time harmonics) . بتحليل هذه المعادلة نحصل على النتائج الآتية :

١ — يمثل كل من الحدين $\cos\left(\omega t - \gamma \frac{\pi x}{\tau_p}\right)$ ، $\cos\left(\omega t + \gamma \frac{\pi x}{\tau_p}\right)$

موجة سائرة (travelling wave) ذات اتساع مقداره $\frac{\sqrt{2}\ uI}{\gamma\pi}$ ، ويتواجد هذا الإتساع عند أماكن مختلفة فى الأزمنة المختلفة على حسب سرعة سير الموجة . لذلك يمكن تحديد سرعة الموجة بتعيين سرعة سير اتساعها ، ويكون ذلك بتطبيق الشرط الخاص بقيمة اتساع الموجة،الذى يجب أن يسير المسافة x فى زمن t ثانية ، بحيث يكون $\cos\left(\omega t \pm \gamma \frac{\pi x}{\tau_p}\right)$ يساوى الواحد الصحيح ، $\left(\omega t \pm \gamma \frac{\pi x}{\tau_p}\right)$ يساوى صفراً . نجد على هذا الأساس أن سرعة سير التوافقية التى درجتها γ ، وهى v_γ تنتج على النحو التالى :

$$\left(\omega t \pm \gamma \frac{\pi x}{\tau_p}\right) = 0 \quad , \quad x = \pm \frac{\omega t \tau_p}{\gamma\pi} = \pm 2f\tau_p \frac{1}{\gamma} t$$

$$v_\gamma = \frac{x}{t} = \pm \frac{\tau_p}{\gamma} 2f \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٦—٣)$$

وهذا يعنى أنه يوجد دائماً توافقتين فراغيتين من الدرجة γ ، إحداهما ذات اتساع مقداره $\frac{\sqrt{2}\ uI}{\gamma\pi}$ ، وتسير فى الاتجاه الموجب للمحور x بالسرعة

$\frac{2f\tau_p}{\gamma}$ ، والثانية ذات اتساع مقداره $-\frac{\sqrt{2}\,uI}{\gamma\pi}$ ، وتسير فى الاتجاه السالب للمحور x بنفس السرعة $\frac{2f\tau_p}{\gamma}$.

٢ — إذا لاحظنا أننا حصلنا على المعادلة (٥—٣) باعتبار المنتج المفرود ، وأننا استخدمنا على هذا الأساس المسافة x على المحور الأفقى المفروض ، بدلا من الزاوية ψ على محيط المنتج الواقعى ، نجد أننا يجب أن نعدل السرعة الخطية v_γ التى حصلنا عليها فى المعادلة (٦—٣) إلى السرعة الزاوية ω_γ بوضع $\tau_p = \pi$ فى هذه المعادله ، حيث :

$$\omega_\gamma = \pm \frac{1}{\gamma}\, 2\pi f = \pm \frac{\omega}{\gamma} \; \cdots\cdots \quad (٣—٧)$$

٣ — يوجد توافقيتين فراغيتين أساسيتين ($\gamma = 1$) اتساع احداهما $\frac{\sqrt{2}\,uI}{\pi}$ ، وتسمى التوافقية الأساسية الأمامية ، وهى تدور بسرعة التزامن n_s $\left(\omega_1 = 2\pi \frac{pn_s}{60}\right)$ فى إتجاه دوران العضو الدائر ، واتساع الثانية $-\frac{\sqrt{2}\,uI}{\pi}$ وتسمى التوافقية الأساسية الخلفية ، وتدور بنفس سرعة التزامن n_s فى عكس اتجاه دوران العضو الدائر $\left(\omega_1 = -2\pi \frac{p\,n_s}{60}\right)$. ويمكن الحصول على نفس التأثير المغناطيسى ، الإستعاضة عن كل من هاتين التوافقيتين بمجموعة من الاقطاب التى طول خطوتها القطبية τ_p ، وعددها بناء على ذلك 2p يساوى عدد الاقطاب الرئيسية على العضو الدائر ، ويحمل كل قطب ملفات تنبيه مكافئة . بذلك يكون التوزيع الفراغى للقوة الدافعة المغناطيسية على مدى الخطوة القطبية للملفات التنبيه المكافئة على شكل منحنى جيبى اتساعه $\frac{\sqrt{2}\,uI}{\pi}$ أمبير لفة ،

وتدور إحدى هاتين المجموعتين ، التى سوف نطلق عليها اسم المجال الأمامى (forward field) بسرعة التزامن n_s فى نفس إتجاه دوران العضو الدائر ، وهو إتجاه الدوران الموجب ، بينما تدور المجموعة الثانية ، التى سوف نطلق عليها اسم المجال الخلفى (backward field) . بسرعة التزامن أيضا ، ولكن فى عكس إتجاه دوران العضو الدائر ، وهو إتجاه الدوران السالب .

٤ — يوجد توافقيات فراغية عالية كثيرة مختلفة الدرجات ، ونحصل عليها بالتعويض عن γ بأعداد صحيحة فردية من 3 إلى مالانهاية فى المعادلة (٥—٣) ويوجد توافقيتين فراغيتين لكل درجة ، إتساع إحداهما $\frac{\sqrt{2}\,uI}{\pi\gamma}$ أى $\frac{1}{\gamma}$ من اتساع التوافقية الفراغية الأساسية الأمامية ، وتدور بالسرعة $\frac{n_s}{\gamma}$ فى الإتجاه الموجب للدوران ، وإتساع الثانية $\frac{\sqrt{2}\,uI}{\pi\gamma}$ — أى $\frac{1}{\gamma}$ من إتساع التوافقية الفراغية الأساسية الخلفية ، وهى تدور بالسرعة $\frac{n_s}{\gamma}$ فى الإتجاه السالب للدوران . هذا ويمكن ، للحصول على نفس التأثير المغناطيسى ، الإستعاضة عن كل من هاتين التوافقيتين بمجموعة من الأقطاب المكافئة ، التى طول خطوتها القطبية $\frac{\tau_p}{\gamma}$ ، وعددها بناء على ذلك $2\gamma p$. بذلك يكون التوزيع الفراغى للقوة الدافعة المغناطيسية ، على مدى الخطوة القطبية ، للفات التنبيه المكافئة على كل قطب من هذه الأقطاب ، على شكل منحنى جيبى إتساعه $\frac{\sqrt{2}\,uI}{\pi\gamma}$ امبير لفة ، وتدور إحدى هاتين المجموعتين ، وهى المجموعة الأمامية ، بالسرعة $\frac{n_s}{\gamma}$ فى إتجاه الدوران الموجب ، بينما تدور المجموعة الثانية ، وهى المجموعة الخلفية ،

بالسرعة $\frac{n_s}{\gamma}$ أيضا فى الإتجاه السالب للدوران .

٥ — تنتج التوافقيات الفراغية التى نوهنا عنها فى 3 ، 4 قوى دافعة كهربية مضادة فى ملفات المنتج، تتوقف قيمة كل منها على عدة عوامل ، منها قيمة الفيض المغناطيسى ، الذى ينشئه كل قطب من أقطاب المجموعة المكافئة المناظرة ، فى الثغرة الهوائية للآلة . ويلاحظ أن تردد هذه القوى الدافعة الكهربية جميعاً هو التردد الأساسى f_1 ، الذى يساوى تردد الينبوع f . فاذا إعتبرنا أن تردد القوة الدافعة الكهربية التى تنتجها التوافقية التى درجتها γ هو f_γ ، نجد أن :

$$f_\gamma = \gamma p \frac{n_s}{60\gamma} = \frac{p\, n_s}{60} = f_1 = f \quad \dots (٨ــ٣)$$

وهذا شرط ضرورى لكى يمكن معادلة هذه القوى الدافعة الكهربية المضادة بضغط الينبوع .

للحصول على علاقات مناظرة للعلاقات السابقة ، عندما تكون الملفات فى الآلة ثلاثية المراحل وموزعة فى مجارى عددها q لكل مرحلة تحت كل قطب ، نعين أولا المنحنيات الفراغية الثلاثة، للقوى الدافعة المغناطيسية y_1 و y_2 و y_3 للمراحل الثلاث ، وذلك باستخدام المعادلة (٥ــ٣) مع مراعاة أنه ، عند إستخدام q مجرى لكل مرحلة تحت كل قطب بدلا من مجرى واحد ، يتعين علينا أن نستخدم عامل التصحيح k_w ، كما سبق شرحه ، فنضع $\frac{quik_w}{2}$ بدلا من $\frac{ui}{2}$ عند استنباط المعادلات المناظرة ، كما أنه بالنسبة للمرحلة الثانيه تستخدم $\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$ بدلا من ωt و $\left(\frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{2\pi}{3}\right)$ بدلا من $\frac{\pi x}{\tau_p}$ ، وبالنسبة

المرحلة الثالثة تستخدم $\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$ بدلا من ωt و $\left(\frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{4\pi}{3}\right)$ بدلا من $\frac{\pi x}{\tau_p}$. وعلى هذا الأساس نحصل على معادلة منحنى التوزيع الفراغى لمحصلة القوى الدافعة المغناطيسية ، حول محيط المنتج ، للملفات ثلاثية المراحل ، عندما يمر فيها مجموعة متزنة من التيارات ثلاثية المراحل ، التى يحتوى المنحنى الزمنى لكل منها على توافقية أساسية فقط . ومع مراعاة أن $qu = \frac{T_{ph}}{p}$ نجد أن :

$$y = y_1 + y_2 + y_3 = f(\psi_1) + (\psi_2) + f(\psi_3) = f(\psi)$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{T_{ph}}{p} I \sum_{\gamma = 1,3,5,\dots} \frac{k_{w\gamma}}{\gamma} \Big[\cos\left\{\omega t - \gamma \frac{\pi x}{\tau_p}\right\}$$

$$- \cos\left\{\omega t + \gamma \frac{\pi x}{\tau_p}\right\} + \cos\left\{\omega t - \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} + \frac{2}{3}\pi(\gamma - 1)\right\}$$

$$- \cos\left\{\omega t + \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{2}{3}\pi(\gamma + 1)\right\} + \cos\left\{\omega t - \gamma \frac{\pi x}{\tau_p}\right.$$

$$\left. + \frac{4}{3}\pi(\gamma - 1)\right\} - \cos\left\{\omega t + \gamma \frac{\pi x}{\tau_p} - \frac{4}{3}\pi(\gamma + 1)\right\}\Big] \qquad (٩—٣)$$

بفرض أن $\alpha = \left(\omega t - \gamma \frac{\pi x}{\tau_p}\right)$ ، $\beta = \left(\omega t + \gamma \frac{\pi x}{\tau_p}\right)$ ،

ثم :

$$S_1 = \cos\alpha + \cos\left[\alpha + \frac{2}{3}\pi(\gamma - 1)\right]$$

$$+ \cos\left[\alpha + \frac{4}{3}\pi(\gamma - 1)\right]$$

$$S_2 = \cos\beta + \cos\left[\beta - \frac{2}{3}\pi(\gamma+1)\right]$$

$$+ \cos\left[\beta - \frac{4}{3}\pi(\gamma+1)\right]$$

نجد أن قيم γ المختلفة تعطى S_1 و S_2 القيم الآتية :

$$\gamma = 1,7,13,\dots \rightarrow S_1 = 3\cos\alpha\,,\ S_2 = 0$$

$$\gamma = 3,9,15,\dots \rightarrow S_1 = 0 \qquad S_2 = 0$$

$$\gamma = 5,11,17,\dots \rightarrow S_1 = 0 \qquad S_2 = 3\cos\beta$$

وبالتعويض بهذه القيم في المعادلة (٩ — ٣) نحصل على صيغة عامة لها هي :

$$y = f(\psi) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}\,\frac{T_{ph}}{p}\,I \sum_{\gamma = 1\dots7,5\dots13,11\dots} \pm \frac{k_{w\gamma}}{\gamma}\cos\left(\omega t \pm \gamma\frac{\pi x}{\tau_p}\right) \quad \dots\dots\dots \quad (١٠ — ٣)$$

بتحليل المعادلة (١٠ — ٣) ، على نفس النمط الذى جرى مع المعادلة (٥ — ٣) ، نستخلص نفس الحقائق التى استخلصناها من المعادلة (٥ — ٣) مع وجود الإختلافات الآتية :

١ — توجد توافقية فراغية أساسية واحدة فقط فى هذه الحالة ، وهى توافقية أمامية اتساعها $\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\,\frac{T_{ph}}{p}\,I\,k_w$ (حيث $\gamma = 1$ ، $S_2 = 0$)، وهى تدور بسرعة التزامن n_s فى نفس إتجاه دوران العضو الدائر . وهذه هى نفس النتيجة التى حصلنا عليها سابقا فى المعادلتين (١ — ٣) ، (٢ — ٣) .

٢ — بالنسبة للتوافقيات الفراغية العالية ،لا توجد توافقيات من الدرجة

الثالثة أو أية درجة تكون مكرراً للعدد ثلاثة ($S_1 = 0 , S_2 = 0 , \gamma = 3,9...$) على الإطلاق .

٣ — توجد توافقية واحدة فقط لكل درجة ، وتكون التوافقيات التى درجتها ($6m + 1$) ، حيث m عدد صحيح موجب ، توافقيات أمامية ، تدور بالسرعة $\frac{n_s}{6m+1}$ فى إتجاه دوران العضو الدائر ، ويبلغ اتساعها $\frac{3\sqrt{2}}{\pi(6m+1)} \frac{T_{ph}}{p} I k_{w\gamma}$ ، بينما تكون التوافقيات التى درجتها ($6m - 1$) توافقيات خلفية ، تدور بالسرعة $\frac{n_s}{6m-1}$ فى عكس إتجاه دوران العضو الدائر ، ويكون إتساعها $\frac{3\sqrt{2}}{\pi(6m-1)} \frac{T_{ph}}{p} I k_{w\gamma}$

فى ختام هذه الدراسة ، الخاصة بالتوافقيات الفراغية فى منحنى القوة الدافعة المغناطيسية ، وعلاقاتها بالتوافقيات الزمنية فى منحنى التيار ، نعيد التأكيد على ما يأتى بالنسبة للمولدات المتزامنة ثلاثية المراحل : باهمال التوافقيات الزمنية العالية فى منحنى التيار ، وإعتبار أنه يحتوى على توافقية زمنية أساسية فقط ، نحصل على توافقية أساسية وتوافقيات فراغيه عالية فى منحنى القوة الدافعة المغناطيسية المحصل للفات المنتج . وباهمال هذه التوافقيات الفراغية العالية أيضا ، يمكننا أن نعتبر أن رد فعل المنتج يتمثل فى مجموعة من الأقطاب المغناطيسية المكافئة ، التى عددها 2p ، وتدور بنفس سرعة التزامن n_s فى إتجاه دوران العضو الدائر ، ويحمل كل قطب مكافىء منها عدداً مكافئا من الأمبير لفات يساوى اتساع التوافقية الفراغية الأساسية ، أى $1.35 \frac{T_{ph}}{p} I k_w$. وينشا المجال المغناطيسى المحصل ، أمام كل قطب فى الثغرة الهوائية ، نتيجة للتأثير

المشترك عليها من الأقطاب الرئيسية والأقطاب المكافئة ، وهو الذى يتمثل فى عدد الخطوط المغناطيسية φ الذى نعوض به فى المعادله (٢ــ٢) للحصول على القوة الدافعة الكهربية المرحلية ، بفعل القوة الدافعة المغناطيسية المحصلة لمجموعتى الأقطاب الرئيسية والمكافئة معاً . هذا ويطلق على المجال المغناطيسى الناشىء عن مجموعة الأقطاب المكافئة ، حول محيط المنتج ، اسم المجال المغناطيسى الدائر (Rotating field) .

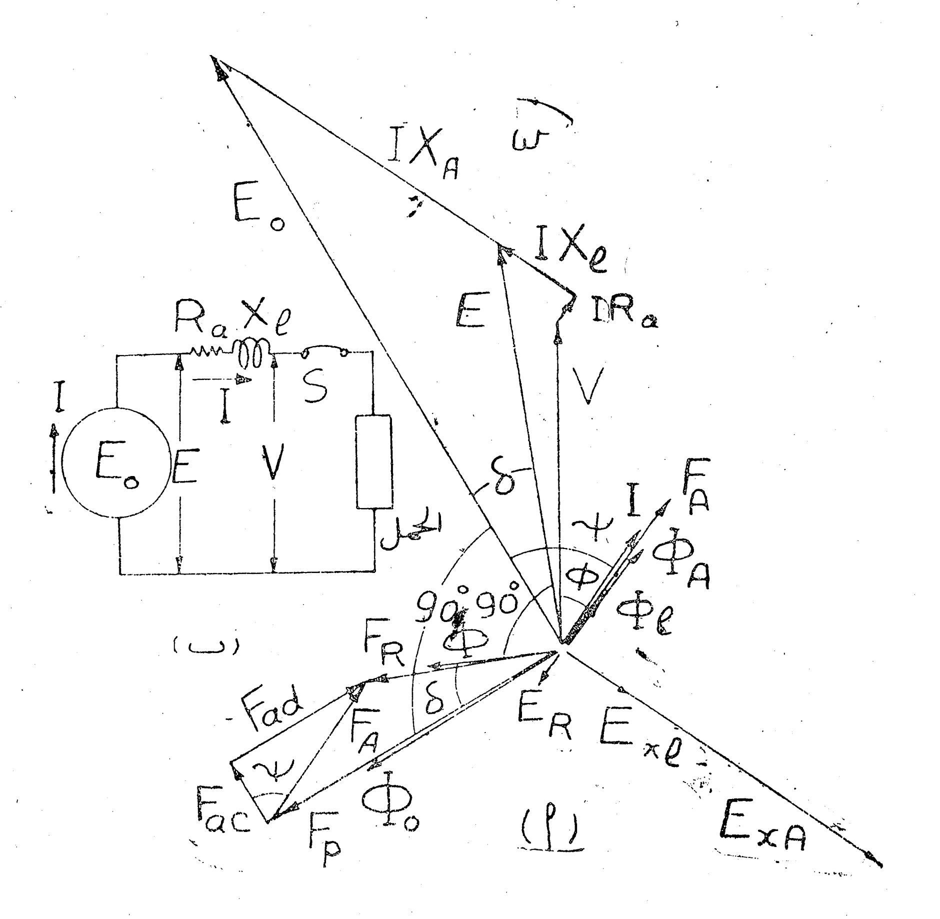
ثانيا ـ معامل تنظيم الضغط

(Voltage regulation)

معنى معامل التنظيم :

يتضح من كل ماسبق شرحه فى أولا أنه عند وجود حمل (load) على الآله ، يتمثل فى تيارات مرحلية معينة (I أمبير لكل مرحلة عندما يكون الحمل متزنا) ، تمر فى دوائر الحمل (التى يمكن اختزالها إلى دوائر تقليدية مكافئة عند اللزوم) ، وتمر أيضا فى ملفات المنتج لإستكمال الدوائر الكهربية المقفله ، يكون رد فعل المنتج مكافئا لمجموعة من الأقطاب المغناطيسية ، التى يحمل كل منها عدداً من الأمبير لفات المكافئة مقداره $AT_A = 1.35 \frac{T_{ph}}{p} Ik_w$. فاذا كان تيار التنبيه فى ملفات الأقطاب الرئيسية يبلغ I_f أمبير فى هذه الحالة ، وعدد اللفات على كل قطب من هذه الأقطاب N_f ، تصبح القوة الدافعة المغناطيسية لكل قطب $AT_p = N_f I_f$ أمبير لفة . وبجمع AT_p مع AT_A جمعاً إتجاهياً نحصل على القوة الدافعة المغناطيسية المحصلة AT_R ، التى تنشىء الفيض المغناطيسى المحصل φ فى الثغرة الهوائية ، الذى تحسب على أساسه قيمة القوة الدافعة الكهربية

المرحلية E_{ph} بالمعادلة (٢ــ٢) . هذه القوة الدافعة الكهربية E_{ph} (المتجه E) هى التى تعطى الضغط المرحلى على طرفى الحمل V ، وهبوط الضغط فى كل من المقاومة المرحلية R_a ، وممانعة التسرب المرحلية (phase leakage reactance) X_l ، الملفات المنتج ، عندما يمر فيها التيار المرحلى I . لذلك فان E_{ph} تساوى المجموع الإتجاهى لهذه الضغوط جميعاً ، كما هو مبين فى شكل (٦ــ٣ أ) ، عندما تكون زاوية الإختلاف المرحلى بين V و I هى Φ .



شكل (٦ــ٣)

عند رفع الحمل (فتح المفتاح S فى شكل (٦ — ٣ب)) تصبح قيمة التيار الذى يمر فى ملفات المنتج تساوى صفراً ، فيختفى تأثير رد فعل المنتج وتصبح قيمة AT_A تساوى صفرا . فى هذه الحالة تنشيء القوة الدافعة المغناطيسية لملفات الأقطاب الرئيسية ، التى تتمثل فى الامبير لفات AT_p على كل قطب ، فيضا مغناطيسياً مقداره ϕ_o خط لكل قطب ، بحيث يمكن على أساسه حساب قيمة القوة الدافعة الكهربية E_o التى تعطيها الآله ، عند رفع الحمل ، وتظهر على طرفيها (لعدم وجود تيار يسبب أى هبوط فى الضغط داخل الآلة) ، وذلك باستخدام ϕ_o فى المعادلة (٢ — ٢) بدلا من ϕ ، حيث :

$$E_o = 4.44 \, f \, T_{ph} \, \phi_o \, k_W \times 10^{-8} \; V \quad \ldots\ldots \quad (٣ — ١١)$$

هذا يعنى أن رفع الحمل يؤدى إلى تغيير قيمة الضغط على طرفى الآلة من V إلى E_o ، كما أن وضع الحمل يؤدى إلى تغيير قيمة الضغط على طرفى الآلة من E_o إلى V . و يطلق على النسبة فى تغيير الضغط على طرفى الآلة $\frac{E_o - V}{V}$ ، نتيجة لرفع الحمل أو وضعه ، اسم معامل تنظيم الضغط للآله ، أو بالإختصار معامل التنظيم ، ويرمز له بالرمز ε ، ويكون معامل التنظيم المئوى عبارة عن حاصل ضرب ε فى مائة .

$$\text{معامل التنظيم} = \varepsilon = \frac{E_o - V}{V} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٣ — ١٢)$$

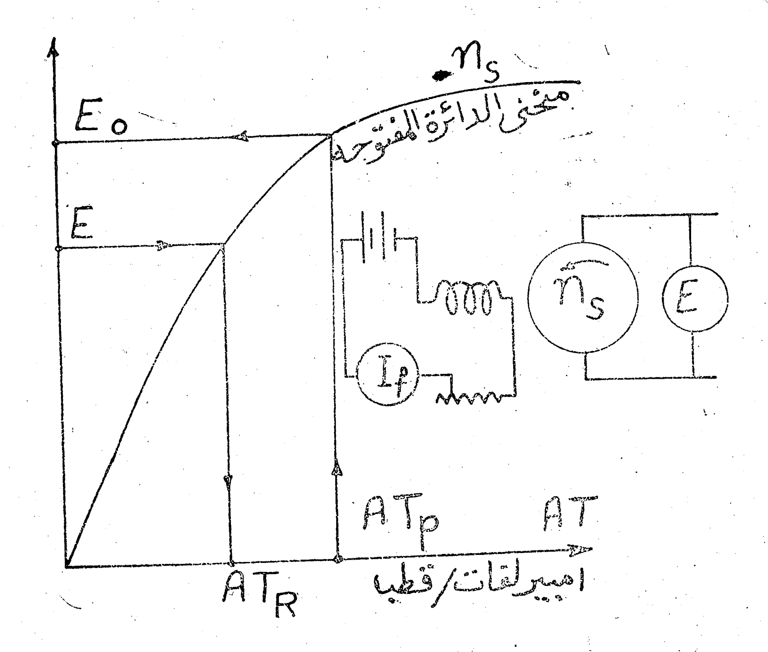
يعطينا معامل التنظيم فكرة واضحة عن مدى التغير الذى يحدث فى قيمة الضغط على طرفى الآلة ، عند تغيير الحمل فى حدود واسعة ، وعند رفعه أو وضعه . ونحن فى حاجة إلى ذلك حتى نكون على بينة من أمر الأجهزة الموصلة على طرفى الآله ، التى قد تتأثر تأثرا ضاراً نتيجة لهذا التغيير . لذلك فان معامل التنظيم قد يكون

من أهم الملامح التى تقرر مبدأ قبول الآلة أو رفضها ، بالنسبة لإستخدامات معينة ، عند اختيار الآلة المناسبة .

وعندما نحتاج إلى حساب معامل التنظيم للمولد المتزامن ، لا تتوافر لدينا عادة المعلومات التى تمكننا من أن نفعل ذلك بمتابعة الخطوات السابقة . ويتبع حساب معامل التنظيم ، فى أغلب الحالات ، طرقا محدودة ومعينة ، سوف نذكرها بالتفصيل فيما يلى . وتعتمد كل من هذه الطرق على معلومات تقليدية ، يعطيها المصنع الذى يصنع الآلة ، خصيصا لذلك ، وتسمى بيانات التصميم (Design Data) . كما أنها قد تعتمد إلى جانب ذلك على بعض المعلومات، التى يمكن أن نحصل عليها بعد إجراء تجارب معينة على الآلة، كما سوف يتضح فيما بعد.

هذا ، وعلى العموم ، فان حساب معامل التنظيم يتبع ، فى جميع هذه الحالات عادة ، المنهاج العام الآتى : يتحدد الضغط الطرفى الذى يلزم الحصول عليه على طرفى الآلة V ، والتيار I ، وزاوية الإختلاف المرحلى بينهما ϕ ، على حسب طبيعة الحمل المراد توصيله إلى الآلة . وبمعلومية R_a و X يمكننا ، برسم مخطط المتجهات المبين فى شكل (٦ — ٣ أ) ، الحصول على E_{ph} اللازم إنتاجها بفعل الفيض المغناطيسى المحصل ϕ ، الذى تنشئه فى الثغرة الهوائية للآله محصلة AT_p و AT_A ، وهى AT_R . نستطيع تحديد قيمة AT_R من منحنى التمغطس للآلة ، الذى يمكن أن نحصل عليه باجراء تجربة اللاحمل على الآلة ، لكى يعطينا العلاقة بين القوة الدافعة الكهربية المرحلية وتيار التنبيه I_f (أو الأمبير لفات على كل قطب $I_f N_f$ باعتبار N_f ذات قيمة ثابتة) ، عند سرعة التزامن n_s ، كما هو مبين فى شكل (٣ — ٧) . نحسب AT_A من المعادلة (٢ — ٣)، ثم نجمعها جمعاً إتجاهياً مع AT_R ، بعد أن نحدد الوضع المرحلى لكل منها بالنسبة للأخرى . بذلك نحصل على AT_p ،

التى يتحدد بناء على قيمتها مقدار E_o من منحنى التمغطس للآلة ، مما يمكننا من استخدام المعادله (١٢ — ٣) لحساب معامل التنظيم . يبين شكل (٦ — ٣) طريقة تطبيق هذا المنهاج العام للحصول على قيمة E_o . وفيما يلى نشرح كيف يتم تحديد الوضع المرحلى النسبى بين كل من AT_A و AT_R و AT_P ، والعوامل التى نأخذها فى الإعتبار فى هذه الأثناء ، وذلك قبل شرح الطرق المختلفة ، التى تتبع لتعيين معامل التنظيم ، وهى تعتمد جميعا على رسم مخطط المتجهات لهذه الكميات الموجهة الثلاث ، والضغوط التى تنتجها الفيوض الناشئة عنها فى الثغرة الهوائية للآلة .



شكل (٧ — ٣)

مخطط متجهات الآلة المتزامنة :

Vector diagram of the synchronous machine

لكى نحدد الأوضاع النسبية للمتجهات الخاصة بكل من AT_A و AT_P و AT_R يجب رسم مخطط المتجهات الذى يجمع بين جميع المتجهات المعنية فى هذ الشأن ، ونعنى بها ، علاوة على هذه المتجهات ، متجهات الضغط الطرفى للآلة V ، وتيار الحمل I ، وهبوط الضغط فى دائرة المنتج ، فى كل من المقاومة ومانعة التسرب ، ثم متجهات القوى الدافعة الكهربية ، التى تنتج فى ملفات المنتج بتأثير الفيوض التى تنتجها القوى الدافعة المغناطيسية للأمبير لفات السابق ذكرها . وهذا هو مخطط متجهات الآلة المتزامنة . ويجب مراعاة الاعتبارات الآتية عند رسم هذا المخطط .

١ — أن هناك نوعين من زوايا الاختلاف المرحلى بين المتجهات فى المخطط ، يجب ألا نخلط بينهما ، وهما زوايا الاختلاف المرحلى الزمنى (time phase difference) وزوايا الاختلاف المرحلى الفراغى (space phase difference) . وبينما يفصل النوع الأول من الزوايا بين الضغوط والتيارات والفيوض المعنية ، فان النوع الثانى يفصل عادة بين محاور القوى الدافعة المغناطيسية ، ممثلة فى محاور الملفات والأقطاب المختلفه .

٢ — لانستطيع أن نقرر أن الفيض المغناطيسى المحصل فى الثغرة الهوائيه Φ ينشأ بفعل القوة الدافعة المغناطيسية AT_R ، التى تنتج من جمع AT_P و AT_A جمعا إتجاهيا ، ما لم تكن هذه القوى الدافعة المغناطيسية الثلاث تنشىء فيوضها ، فى الثغرة الهوائية ، بالتأثير على دوائر مغناطيسيه ، تشتمل كاجزاء منها على هذه الثغرة ، وتكون متماثلة تماما . وإلا فاننا يجب أن نحسب الفيض المغناطيسى الذى

تنشئة كل قوة دافعة مغناطيسية من القوتين AT_A و AT_P على حدة ، باعتبار المعاوقة التى تقابلها كل منها فى الدوائر المغناطيسية التى تؤثر عليهـــا ، ثم نجمع الفيضين الناشئين للحصول على الفيض المغناطيسى المحصل ϕ . وهنا يكمن السبب الرئيسى الذى يجعلنا فى الواقع نفرق بين طريقة رسم مخطط المتجهات فى كل من حالتى الآلات التوربينية ، والآلات ذات الأقطـاب البـارزة . فبينما نجـد أنه فى حالة الآلات التوربينيـة يتيح لنـا العضـو الدائر الاسطوانى الشكل ، الذى يشبـه فى تكوينه السطحى العضو الثابت ، أن نعتبر أن الدوائر المغناطيسيـة ، التى تؤثر عليها القوى الدافعة المغناطيسية لملفات المنتج وملفات المجال ، متماثلة ، فانها فى حالة الآلات ذات الأقطاب البارزة تؤثر على دوائر مغناطيسية مختلفة التكوين والمعاوقة ، وذلك نتيجة لوجود الفراغ بين الأقطاب ، ممـــا يؤدى إلى زيادة طول الثغرة الهوائية ، وزيادة المعاوقة المغناطيسية ، بناء على ذلك ، زيادة كبيرة .

٣ — يجب ألا نخلط فى الإتجاه بين هبوط الضغط ، ومركبة القوة الدافعة الكهربية اللازمة للموازنة أو التعادل مع هذا الهبوط ، وهما فى إتجاهين متضادين . وعلى سبيل المثال نجد أن V و IR_a و IX_l ، فى مخطط المتجهـــات المبين فى شكل (٦—٣) ، هى مركبات القوة الدافعة الكهربية (التى يمثلها المتجه E فى الرسم) اللازمة لموازنة هبوطات الضغط فى معاوقة الحمل z ، وكل من المقاومه وممانعـة التسرب المرحلية لملفات المنتج . أما هبوطـات الضغط نفسهـا E_{xl} ، E_R ، Iz فتكون فى الاتجاه المضاد ، وذلك لكى يتحقق قانون كيرشوف عندما نضع

$$E + Iz + IR_a + IX_l = 0 .$$

٤ — سبق أن ذكرنا أننـا سوف نعتبر أن القوة الدافعـة المغناطيسية للمنتج تتمثل فى اتساع التوافقية الفراغية الأساسية لمنحنى التوزيع الفراغى ، الذى حصلنا

عليه فى شكلى (١ — ٣) ، (٢ — ٣) ، ثم بالمعادلة (١ — ٣) ، وقيمتها AT_A أمبير لفه لكل قطب ، وهى قيمة ثابتة بالنسبة للزمن ، ولكن المتجه الذى يمثلها ، وسوف نرمز له بالرمز F_A ، ينطبق دائما على محور الملفات التى يكون التيار فيها فى قيمة النهاية العظمى له . لذلك نجد أن المتجه F_A يدور فى الإتجاه الموجب للدوران بسرعة التزامن n_s ، ويمكن بناء على ذلك اعطاؤه نفس الوضع المرحلى فى مخطط المتجهات ، الذى يأخذه التيار I ، بحيث ينطبق دائما عليه .

٥ — يكون المتجه الذى يمثل الفيض المغناطيسى المحصل ϕ ، على حسب قانونى فراداى ولنز للتأثير الكهرومغناطيسى $\left(e = -N\frac{d\phi}{dt}\right)$ ، متقدما على متجه القوة الدافعة الكهربية المرحليـــة ، الذى نرمز له بالرمز E ، بزاوية اختلاف مرحلى زمنى مقدارها 90 درجـــة كهربية . وتكون القوة الدافعة المغناطيسية المحصلة المتمثلة فى القيمة AT_R ، ثابتة بالنسبة للزمن ، ولكن المتجه الذى يمثلها ، ونرمز له بالرمز F_R ، يدور فى الإتجاه الموجب للدوران بسرعة التزامن n_s . لذلك يمكن إعطاء المتجه F_R نفس الوضع الذى يأخذه المتجه ϕ فى مخطط المتجهات بحيث ينطبق دائما عليه . وبناء على ذلك نجد أن زاوية الاختلاف المرحلى الفراغى بين F_A و F_R فى مخطط المتجهات هى نفس زاوية الاختلاف المرحلى الزمنى بين I و ϕ ، أى $(\psi' + 90)$ ، كما يظهر فى مخطط المتجهات فى شكل (٦ — ٣) ، وذلك باعتبار أن ψ هى زاوية الاختلاف المرحلى الزمنى بين كل من I و E .

بناء على هذه الأسس جميعها نستطيع الآن بيان كيفية رسم مخطط المتجهات ، لكل من الآلة التوربينية ، والآلة ذات الأقطاب البارزة .

١ — مخطط متجهات الآلة التوربينية :

تمتلك الآلة التوربينيـة عضواً دائراً اسطوانيا (Cylindrical rotor) ، يحتوى على مجارى ، توضع فيها ملفات التنبيه ، التى تكون مجـالا مغناطيسيا ذا قطبين فقط ، كما سبق شرحه بالإشارة إلى شكل (٥ — ٢) . وفى هذه الحالة يمكننا أن نعتبر أن معاوقة الدائرة المغناطيسية ، التى تؤثر عليها كل من الأمبير لفـات AT_P و AT_A و AT_R ، واحدة بالنسبة لأى وضع من أوضاع العضو الدائر ، وذلك نظراً لتماثل هذه الأوضاع جميعهـا ، نتيجة التكوين الاسطوانى للعضو الدائر . نستطيع على هذا الأساس أن نتعامل مع المتجهـات F_P و F_A و F_R بالجمع أو بالطرح اتجاهيا ، على حسب أوضاعها فى مخطط المتجهات ، عندما نريد جمع أو طرح الفيوض الناشئة عنها للحصول ، على واحد منها فى النهاية .

يمثل شكل (٦ — ٣ أ) بأكمله ، فى الواقع ، مخطط المتجهات للآلة التوربينية ، ونضيف فيما يلى بعض الايضاحات الخاصة بالمتجهات التى لم يرد ذكرها فيما سبق ، مع موجز لما أتى ذكره ، وذلك حتى تكتمل الصورة بالنسبة لمخطط متجهات هذا النوع من الآلات المتزامنة بالذات :

١ — يتحدد الضغط الطرفى للآلة V ، وتيار الحمل I ، وزاوية الاختلاف المرحلى بينهما ϕ ، على حسب نوع الحمل ومتطلباته . E_R هى عبارة عن هبوط الضغط فى المقاومة المرحلية للملفات المنتج R_a ، نتيجة مرور التيار المرحلى I فيها ، وتكون لذلك فى عكس إتجاه I . أما IR_a فهى مركبة الضغط فى القوة الدافعة الكهربية للآلة لموازنة E_R ، وهى لذلك فى عكس إتجاهها . ϕ_1 عبارة عن الفيض المتسرب (leakage flux) حول الملفات (بعضه متسرب فى الأسنان ، وهو يعبر الثغرة الهوائية ، ولكنه لا يصل إلى الأقطاب الرئيسية ، وبعضه متسرب حول الأجزاء

الطرفية للملفات) . وهذا الفيض المتسرب يسبب هبوطا فى الضغط E_{xl} فى الملفات ، يمكن حسابه على أساس قيمة معينة لمعامل الحث الذاتى التى تعطى الممانعة X_l (يكون حساب معامل الحث الذاتى على نمط الطريقة التى اتبعت فى حالة آلات التيار المستمر ، كتاب هندسه الآلات الكهربية ص ٥٧٦ — ٥٨٠) . تكون ϕ_l فى اتفاق مرحلى مع I (تهمل زاوية التخلف المغناطيسى بينهما بسبب وجود ثغرة هوائية كبيرة نسبيا فى الدائرة المغناطيسية) ، E_{xl} متخلفة عنها مرحليا بزاوية مقدارها 90 درجة . IX_l هى مركبة الضغط فى القوة الدافعة الكهربية للآلة ، اللازمة لموازنة E_{xl} ، وهى لذلك فى عكس إتجاهها . بجمع المتجهات V و IR_a و IX_l نحصل على المتجه E .

٢ — ϕ هى قيمة الفيض المغناطيسى المحصل فى الثغرة الهوائية الذى ينتج E ، فهما متعامدان ، ويكون F_R متجه القوة الدافعة المغناطيسية المحصلة AT_R فى إتجاه ϕ ، بينما يكون F_A متجه القوة الدافعة المغناطيسية AT_A فى إتجاه I ، بحيث يحصران بينهما الزاوية $\phi + 90$ ، ونحصل منهما على F_p ، متجه القوة الدافعة المغناطيسية AT_p ، الذى يكون فى إتجاه ϕ_o ، الفيض المغناطيسى الكلى فى الثغرة الهوائية عند رفع الحمل . E_o هى القوة الدافعة الكهربية التى ينتجها الفيض ϕ_o . ويربط E بـ ϕ و E_o بـ ϕ_o معادلة القوة الدافعة الكهربية (٢ — ٢) .

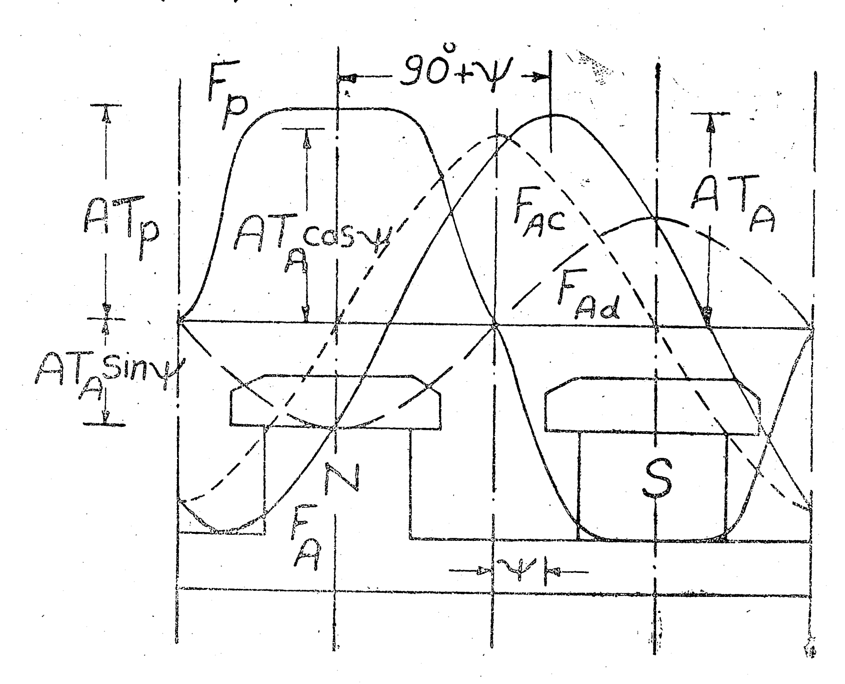
٣ — نحصل على قيمة AT_R من منحنى الدائرة المفتوحة (open circuit characteristic) ، وهو نفس منحنى التمغطس أو اللا حمل المبين فى شكل (٧ — ٣) ، وذلك بمعرفة قيمة E . كما نحصل على قيمة E_o ، المناظرة لقيمة AT_p ، التى نحصل عليها من مخطط المتجهات (الممثلة بالمتجه F_p) ، من نفس هذا المنحنى أيضا ، كما هو موضح على الشكل هذا ونظرا لصغر قيمة كل من IR_a و IX_l

يحسن بنا حساب قيمة E ، وعدم الإعتماد فى الحصول عليها أو على ′ψ من الرسم ، ونجد فى هذه الحالة أن :

$$E = \sqrt{(V\cos\phi + IR_a)^2 + (V\sin\phi + IX_l)^2} \quad \cdots (٣-١٣)$$

$$\text{(E , I الزاوية بين)} \quad \psi' = \tan^{-1}\frac{V\sin\phi + IX_l}{V\cos\phi + IR_a} \overset{?}{=} \phi \quad \cdots (٣-١٤)$$

٤ — يكون منحنى الدائرة المفتوحة معطى عادة مع بيانات التصميم الآلة ، فان لم يتيسر الحصول عليه عن هذا الطريق يمكننا إجراء تجربة اللا حمل للحصول على هذا المنحنى . وفى هذه الحالة توصل الآلة كما هو مبين فى شكل (٧—٣) وتدار بدون



شكل (٨ - ٣)

حمل عند سرعة التزامن ، التى تحفظ ثابتة ، وتؤخذ قراءات الضغط المرحلى مع تيار التنبيه I_f (الذى يضرب فى N_f للحصول على قيم $I_f N_f$ المناظرة) . وإذا لم

يمكن حفظ السرعة عند القيمة n_s يجرى تصحيح قراءات الضغط بالضـــرب فى نسبة n_s إلى السرعة الفعلية .

٥ ـــ يعمل رد فعل المنتج عـلى خفض قيمة الضغط المرحـــلى المتولد فى ملفات المنتج من القيمة E_o إلى القيمة E نتيجة لخفض قيمة الفيض المغناطيسى فى الثغرة الهوائية من القيمة ϕ_o إلى القيمة ϕ . ويكون هبوط الضغط الممثل بالمتجه E_{xA} فى هذه الحالة ناشئا عن الفيض المغناطيسى ϕ_A ، الذى تنشئه القوة الدافعة المغناطيسية AT_A ، الممثلة بالمتجه F_A ، فى الثغرة الهوائيه للآلة ، وهو يعطى عند جمعه إتجاهيا مع ϕ_o الفيض المغناطيسى ϕ . نظراً لأن ϕ_A يكون فى توافق مرحلى مع ϕ_I ، مما يجعل E_{xA} فى توافق مرحـلى مع E_{xI} ، فان مركبـة الضغط IX_A ، فى القوة الدافعة الكهربية للآلة ، التى تعادل E_{xA} تصبح فى إتجاه IX_I ، ويمكن اعتبارها ذات طبيعة مماثلة لها . وهذا يعنى أننا نستطيع اعتبار تأثير رد فعل المنتج ، على القوة الدافعة الكهربية للآلة E_o ، معادلا لفعل ممانعة حثية ، قيمتها X_A تساوى $\frac{E_{xA}}{I}$ ، ويطلق عليها اسم ممانعة رد الفعل (reaction reactance) . ويمكن فى هذه الحالة جمع X_I و X_A فى ممانعة واحدة ، تستخدم للحصول عـلى E_o من V مباشرة ، وتسمى ممانعة التزامن (synchronous reactance) و يرمز لها بالرمز X_s .
وباضافة R_a إلى هذه الممانعة نحصـل عـلى معاوقة التزامن (synchronous impedance) ، ويرمز لهـــا بالرمز Z_s ، حيث $Z_s = R_a + JX_s$ ، وسوف نعود إلى الحديث عن هذه الممانعه ، بشىء أكثر من التفصيل ، فيما بعد .

٦ ـــ الزاوية δ هى مقدار الازاحة التى تحدث لمحور الفيض الأصلى ϕ_o . الذى ينطبق مع محور القطب الرئيسى على العضو الدائر ، نتيجة لرد فعل المنتج . وهذا النوع من التأثير لرد فعل المنتج يطلق عليه التأثير المغناطيسى المتعامد لرد

فعل المنتج (Cross magnetising effect of armature reaction) .
وهو ينتج من مركبة التيار التى تكون فى اتفاق مرحلى مع الضغط E_o ، ويشبه فى طبيعته رد فعل المنتج فى آلات التيار المستمر المسمى بهذا الاسم . وتكون δ فى هذه الحالة عبارة عن الزاوية بالدرجات الكهربية التى يتخلف بها محور المجال المغناطيسى المحصل Φ عن محور المجال المغناطيسى الأصلى، للقطب الرئيسى Φ_o ، الذى ينطبق على محور هذا القطب . أما بالنسبة لمركبة التيار المتعامدة مع E_o ، فهى تعطى تأثيراً مغناطيسيا مباشراً على الأقطاب الرئيسية . لذلك يطلق على هذا النوع من التأثير لرد فعل المنتج اسم التأثير المغناطيسى المباشر لرد فعل المنتج (Direct magnetising effect of armature reaction) ويكون التأثير المباشر بالإضافة أو الطرح ، ويتوقف هذا على نوع الآلة هل هى محرك أو مولد، كما يتوقف على نوع مركبة التيار هل هى سعوية أو حثية (inductive or capacitive).
يبين شكل (٨ــ٣) كيف تنتج التأثيرات المغناطيسية المختلفة لرد فعل المنتج بناء على تحليله إلى مركبتين ، متعامدة ومباشرة .

وكما أننا إعتبرنا أن رد فعل المنتج ، الذى يتمثل فى تأثير الفيض المغناطيسى الناشىء عن ملفات المنتج على الفيض المغناطيسى للاقطاب ، يمكن أن يمثل بالممانعة X_A ، التى تحدد مع X_1 ممانعة التزامن X_s للآلة ، فانه يمكن إعتبار ممانعة تأخذ فى الحساب رد فعل المنتج المباشر المكافىء ، ويطلق عليها اسم ممانعة التزامن للمحور المباشر (Direct axis synchronous reactance) ، ويرمز لهـــا بالرمز X_{sd} ، ثم ممانعة ثانية ، تأخذ فى الحساب تأثير رد فعل المنتج المتعامد ويطلق عليها اسم ممانعة التزامن للمحور المتعامد (quadrature axis synchronous reactance) ، بحيث يكون تأثير الممانعتين معاً مساوياً لتأثير ممانعة

التزامن X_s .

٧ — يمكن بناء على ماسبق ذكره فى ٦ تحليل المتجه F_A إلى مركبتين F_{Ac} و F_{Ad} . تكون قيمة F_{Ac} عبارة عن $AT_A \cos \psi$ وقيمة F_{Ad} عبارة عن $AT_A \sin \psi$. وهذا يعنى تحليل التوافقية الفراغية الأساسية لرد فعل المنتج إلى مركبتين (لكل منهما توزيع فراغى على شكل منحنى جيبى أيضا) ، ينطبق محور احداها وهى الممثلة بالمتجه F_{Ad} على محور القطب ، وتعطى التأثير المغناطيسى المباشر ، ويبعد محور الثانية زاوية مقدارها 90 درجة عن هذا المحور ، وتعطى التأثير المغناطيسى المتعامد . ونظرا لأن كل هذه القوى الدافعة المغناطيسية تقابل نفس المعاوقة المغناطيسية عند تأثيرها على الدوائر المغناطيسية المختلفة فى الآلة التوربينية ، فاننا لانحتاج إلى تحليل F_A إلى F_{Ac} و F_{Ad} فى حالة الآلات التوربينية . ونكتفى باستخدام المتجهات F_R و F_A و F_P ، كما سبق ذكره .

ب — مخطط متجهات الآلة ذات الأقطاب البارزة ونظرية بلوندل لرد الفعل المزدوج (Blondel two reaction theory) :

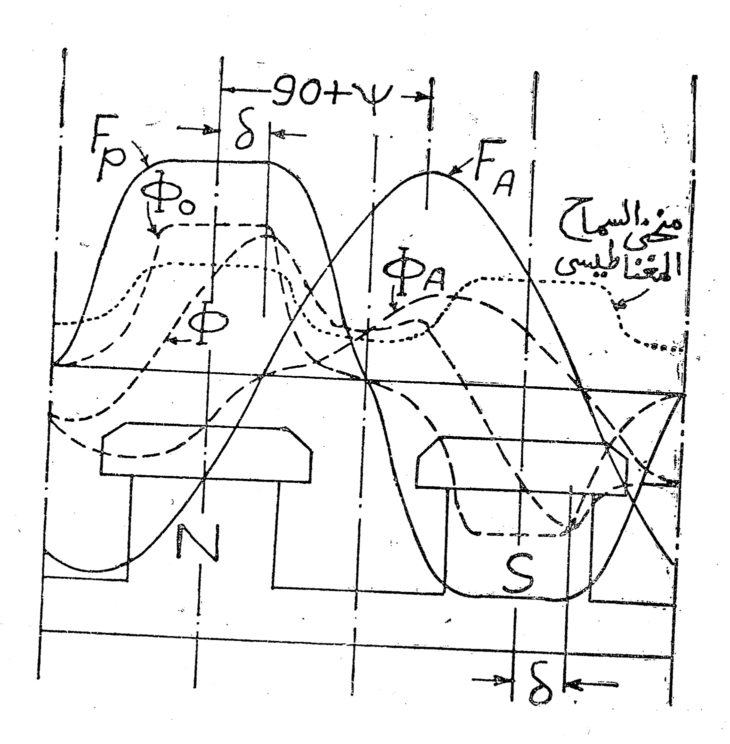
أمكن فى حالة الآلة التوربينية التغاضى عن التقريب الناشىء عن استخدام التوافقيتين الفراغيتين الأساسيتين لمنحنى القوة الدافعة المغناطيسية لملفات الأقطاب الرئيسية وملفات المنتج للحصول على القوة الدافعة المغناطيسية AT_R ، بمعلومية كل من AT_P و AT_A ، ثم استخدامها لتحديد ϕ أو تحديد القوة الدافعة الكهربية المرحلية E مباشرة . وذلك نتيجة التماثل فى التكوين بين العضو الدائر والعضو الثابت أولا ، ثم ثبوت قيمة المعاوقة المغناطيسية بالتقريب حول أى مسار من المسارات التى تدفع فيها هذه القوى الدافعة المغناطيسية فيوضها .

نجد فى الآلات ذات الأقطاب البارزة أن تكوين العضو الدائر يختلف

اختلافا تاما عن تكوين العضو الثابت ، فبينما يوجد فى الأول ، على مدى محيطه ، أجزاء حديدية غير منتظمة الاستدارة (هى سطوح الأقطاب التى تعطى شكلا معينا لتحديد أبعاد مطلوبة للثغرة الهوائية) ، ثم تجاويف كبيرة (هى الفراغات بين الأقطاب التى تمتلىء بملفات التنبيه) ، يكون الثانى سطحا اسطوانيا منتظما تتخلله المجارى . وفى هذه الحالة لا نستطيع أن نوجد العلاقات بين القوى الدافعة المغناطيسية المختلفة على اعتبار أنها تتناسب جميعاً ، بمعامل مشترك ، مع الفيوض الناشئة عنها ، وإنما يجب أن نتعامل مع هذه الفيوض مباشرة . كما أننا لا نستطيع أيضا ، من باب التقريب المقبول ، كما فعلنا فى الحالة السابقة ، أن نهمل التوافقيات الفراغية العالية ، فى كل من المنحنى الفراغى لملفات الأقطـــاب الرئيسية ، والمنحنى الفراغى للملفات المنتج ، ونكتفى بالتعامل مع التوافقيتين الفراغيتين لهذين المنحنيين .

إذا راجعنا ما تم عمله بالنسبة للآلات التوربينية ، نجد أن المطلوب النهائى ، لكل ما أجرى من حسابات ، هو تحديد قيمة معامل التنظيم ، على أساس ضغط معين V مطلوب على طرفى الآلة ، عند تيار الحمل I ، الذى يختلف عن الضغط مرحلياً بالزاوية φ . وقد بينا العلاقات ، التى تربط بين الكميات المختلفة فى مخطط المتجهات ، لكى نجد الطريقة التى نستطيع أن نحدد بها AT_p ، وهى قيمة الأمبير لفات التى يلزم وجودها على كل قطب من الأقطاب الرئيسية عند الحمـــل الكامل ذى المواصفات المعطاه ، لكى تعادل الأمبير لفات AT_A الناشئة من رد فعل تيار هذا الحمل ، ثم تبقى الأمبير لفات المحصلة AT_R ، لكى تعطى المجال المغناطيسى المحصل φ فى الثغرة الهوائية ، الذى ينتج القوة الدافعة الكهربية E ، فنحصل على ضغط طرفى V . ونحن فى حاجة إلى مثل هذا المنهاج ، لتحديد معامل التنظيم فى حالة

الآلات ذات الأقطاب البارزة ، نسترشد فيه بمخطط متجهات، مرسوم بمعلومية كل من AT_A و AT_R ، للحصول على AT_p معينة ، وذلك دون التعرض لتحديد قيم الفيوض المختلفة ، التى تعتمد على القيم المختلفة للمعاوقة المغناطيسية المعقدة لمسارات هذه الفيوض ، عندما تؤثر القوى الدافعة المغناطيسية عند نقط مختلفة على المنتج أو على الأقطاب المغناطيسية . ولكى ندرك مدى نصيب الحل ، الذى أوجده بلوندل لهذه المسألة ، من الصحة ، على هدى الإعتبارات السابقة ، يجب أن نستعرض أولا التفاصيل الكاملة لموضوع رد فعل المنتج فى الآلات ذات الأقطاب البارزة على النحو التالى :



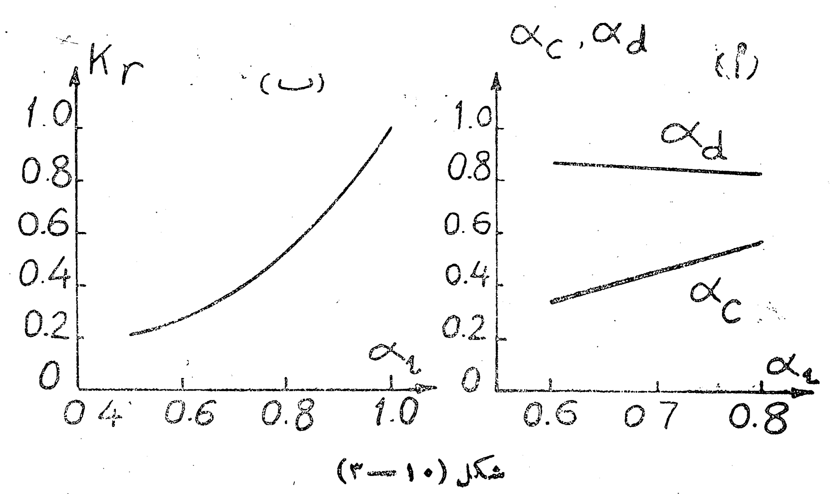
شكل (٩ — ٣)

ينشأ الفيض المغناطيسى ، الذى يؤثر به رد فعل المنتج على الفيض المغناطيسى للأقطاب الرئيسية ، بفعل القوة الدافعة المغناطيسية لملفات المنتج ، التى يمكن الحصول على القيم المختلفة لها ، عند النقط المختلفة حول محيط المنتج ، باستخدام المعادلة (١٠ — ٣) ، أو المنحنى الذى تمثله ، المبين فى شكل (٩ — ٣)، مع السماح المغناطيسى (magnetic permeance) (عكس المعاوقة المغناطيسية) ، للثغرة الهوائية عند هذه النقط ، محسوبا من ناحية المنتج ، والذى نفترض أننا حصلنا على منحنى توزيعه كما هو مبين فى شكل (٩ — ٣) (سوف نبين كيفية الحصول على هذا المنحنى فى باب تصميم الآلات المتزامنة) . وبضرب الاحداثيين الرأسيين ، فى المنحنيين السابقين عند النقط المختلفة ، نحصل على منحنى توزيع الفيض المغناطيسى ϕ_A ، لرد فعل المنتج على مدى الخطوة القطبية ، كما هو مبين فى شكل (٩ — ٣) . بذلك يصبح مطلوبا منا الآن إيجاد قيمة الأمبير لفات AT_p ، اللازم وضعها على كل قطب من الأقطاب الرئيسية ، لكى تعطى الفيض المغناطيسى ϕ_o ، المبين توزيعه على مدى الخطوة القطبية فى شكل (٩ — ٣) ، والذى نحصل عليه باستخدام منحنى توزيع القوة الدافعة المغناطيسية لملفات الأقطاب الرئيسية ، عند النقط المختلفة على مدى الخطوة القطبية ، مع السماح المغناطيسى للثغرة الهوائية عند هذه النقط ، محسوبا من ناحية القطب ، والذى نفترض أننا حصلنا على منحنى توزيعه كما هو مبين فى نفس الشكل . هذا ويجب أن تقع محصلة ϕ_o و ϕ_A ، عند النقط المختلفة على مدى الخطوة القطبية ، على منحنى توزيع الفيض المغناطيسى المحصل ϕ ، الذى يعطى القوة الدافعة الكهربية E ، ثم الضغط الطرفى V ، عندما يمر تيار الحمل المعلوم I فى ملفات المنتج . وهذه العملية يكاد يكون تنفيذها مستحيلا على هذا النحو لعدة اعتبارات ، أهمها أن الحصول على منحنى توزيع ϕ_o يستلزم معرفة AT_p ، التى نريد تحديدها على أساس معين للفيض المغناطيسى

المحصل ϕ . ثم إن معرفة الفيض المغناطيسى المحصل ϕ ، على أساس قيمة معينة للقوة الدافعة الكهربية E ، لا يساعد فى شىء ، مادام منحنى توزيع هذا الفيض على مدى الخطوة القطبية غير معلوم ، نظراً لجهلنا بالمنحنى الفراغى لتوزيع القوة الدافعة المغناطيسية F_R على مدى هذه الخطوة .

وقد أمكن لبلوندل إيجاد طريقة تقريبية ، تعطى نتائج قريبة جداً من النتائج التى تعطيها التجارب العملية على الآلة الواقعية ، بحيث يمكن التعويل عليها ، واعتبارها صحيحة بدرجة مقبولة من التقريب . وقد أطلق بلوندل على طريقته هذه اسم طريقة رد الفعل المزدوج ، وفرق فيها بين المحورين الأساسيين فى الآلة ، اللذين يختلف توزيع السماح المغناطيسى للثغرة الهوائية حول كل منهما اختلافاً بيناً ، بسبب وجود الفجوات بين الأقطاب ، مما يؤدى إلى اختلاف قيمة الفيض المغناطيسى ، الذى تنشئه قوة دافعة مغناطيسية معينة ، عندما ينطبق محور المتجه الذى يمثلها مع كل محور من هذين المحورين ، وهما المحور المباشر والمحور المتعامد. ونستطيع على أساس نظرية بلوندل ، وما أدخل عليها من تعديلات ، أن نعود إلى استخدام الكميات AT_A و AT_R كما استخدمناها فى الحالة السابقة ، مع استخدام ثوابت معينة ، وتعديل فى أوضاع المتجهات ، بحيث تأخذ فى الاعتبار جميع العوامل المؤثرة السابقة . ويكون ذلك على أساس أن التأثير الناشىء عن رد فعل المنتج ذو نوعين مختلفين ، وهما التأثير المباشر والتأثير المتعامد ، بحيث ينشأ التأثير من النوع المباشر عندما يقع محور القوة الدافعة المغناطيسية ، التى مقدارها AT_A ويمثلها المتجه F_A ، على محور القطب الرئيسى ، وينشأ التأثير من النوع المتعامد عندما يقع محور نفس هذه القوة الدافعة المغناطيسية على محور التعادل بين قطبين رئيسيين . ومن ثم نفترض أنه يوجد على نفس محور AT_A أمبير لفات بالمقدار $AT_d = \alpha_d \, AT_A$ ، بحيث تعطى تأثيرا على المحور المباشر يتحدد

بالقيمة $AT_d \sin\psi$ ، وأمبير لفات بالمقدار $AT_c = \alpha_c AT_A$ ، مع الأولى فى نفس الوقت، وتعطى تأثيرا على المحور المتعامد تتحدد قيمته بالمقدار $AT_c \cos\psi$ بحيث تؤخذ الإعتبارات السابق شرحها ، بالنسبة للعلاقات المختلفة بين القوى الدافعة المغناطيسية المؤثرة ، والسماح المغناطيسى الذى يقابلها فى المواضع المختلفة، عند تقدير كل من α_c و α_d ، اللذين اتضح أنهما يتوقفان على قيمة النسبة بين طول قوس سطح القطب b ، والخطوة القطبية τ_p ، التى يرمز اليها بالرمز α_i $\left(\alpha_i = \frac{b}{\tau_p} \right)$ (سوف نعود إلى تفصيل ذلك فى باب تصميم الآلات المتزامنة، وتجد فى شكل (١٠ — ٣ أ) المنحنيات التى تعطى α_d و α_c كداله لـ α_i) . هذا ونظراً لأن التأثير المتعامد لرد فعل المنتج فى المحور المتعامد يتوقف على

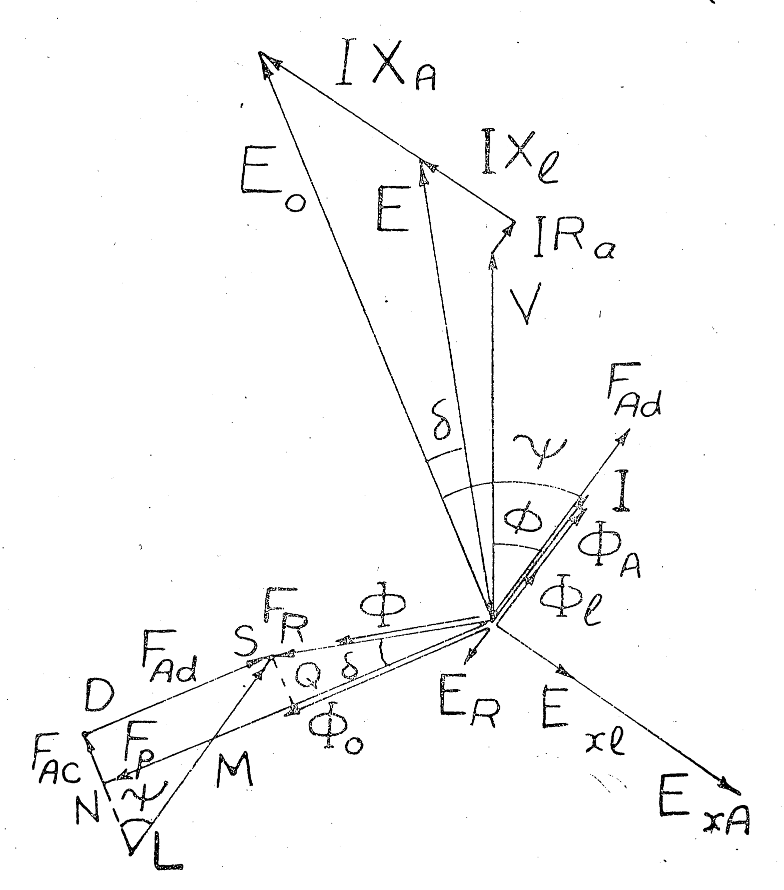


شكل (١٠ — ٣)

$AT_A \cos\psi$ ، والتأثير المباشر فى المحور المباشر يتوقف على $AT_A \sin\psi$ ، فاننا نعتبر أن طول المتجه الذى تنشأ بسببه زاوية الإزاحة δ عبارة عن $AT_c \cos\psi$ ، وأن طول المتجه الذى يعطى قيمة الأمبير لفات AT_p ، اللازم وجودها عند الحمل الكامل، يتحدد بالقيمة $AT_d \sin\psi$.

يتضح من هذا كله أننا نستطيع رسم مخطط المتجهات للآلة ذات الأقطاب البارزة ، بطريقة تشبه تلك التى اتبعناها فى حالة الآلة التوربينية ، المبينة فى شكل (٦ــ٣) ، على النحو التالى :

١ ــ نرسم الموجهات I و V , E . . ، ألخ ، حتى نحصل على المتجه F_R ، بنفس الطريقة التى اتبعناها فى شكل (٦ــ٣) ، وذلك كما هو مبين فى شكل (١١ــ٣) ،



شكل (١١ــ٣)

٢ — بدلا من المتجه F_A نرسم الآن ، وفى نفس إتجاه I ، المتجهان F_c و F_d ، حيث يمثل الأول الأمبير لفات AT_c ، ويمثل الثانى الأمبير لفات AT_d ، نصل النقطة M (طرف F_c) بالنقطة O (نقطة الأصل) ونمد OM حتى يقابل العمود الساقط عليه من L (طرف F_d) فى N ، فيكون ON هو المتجه F_p المطلوب ، وهو يمثل الأمبير لفات AT_p اللازم وضعها على كل قطب من الأقطاب الرئيسية ، لكى نحصل على الضغط الطرفى V عند الحمل الكامل . وفيما يلى العلاقات التى تبرهن على ذلك :

$$NQ = DS = SL \sin\psi = AT_d \sin\psi = \alpha_d\, AT_A \sin\psi$$

$$= F_{Ad}$$

$$SQ = SM \cos\psi = AT_c \cos\psi = \alpha_c\, AT_A \cos\psi = F_{Ac}$$

إذا لم يتيسر الحصول على α_c و α_d من المنحنيين المبينين فى شكل(١٠ — ٣)، يمكن حسابهما من المعادلتين الآتيتين :

$$\alpha_c = \frac{\alpha_i \pi - \sin \alpha_i \pi + \frac{2}{3} \cos \frac{\alpha_i \pi}{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{4}{\pi} \sin \alpha_i \frac{\pi}{2}}$$

$$\alpha_d = \frac{\alpha_i \pi + \sin \alpha_i \pi}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{4}{\pi} \sin \alpha_i \frac{\pi}{2}} \quad \ldots\ldots \quad (٣ — ١٥)$$

٣ — يمكن فى بعض الحالات تقريب α_d إلى الواحد الصحيح (وهى تساوى 0,85 فى المتوسط تقريبا) ، بحيث تصبح $AT_d = AT_A$ ، وفى هذه الحالة تستخدم النسبة K_r ، وهى النسبة بين السماح المغناطيسى لكل من مسارى الفيض

المغناطيسى فى المحور المتعامد والمحور المباشر ، لرسم مخطط المتجهات ، الذى لا يختلف عن سابقه فى شىء سوى أننا نأخذ SL ممثلا للأمبير لفات AT_A ، بدلا من AT_d و SM ممثلا للأمبير لفات $K_r AT_A$ بدلا من AT_c . ويبين شكل (١٠ — ٣ب) القيم المختلفة للمعامل K_r كدالة للنسبة a_i أيضا . ويعنى رسم مخطط المتجهات على هذا النحو الأخير ، أننا اعتبرنا أن الفرق، بين حالتى الآلة التوربينية والآلة ذات الأقطاب البارزة، يكمن فى هذه الحالة فى وجود الفجوات الهوائية الكبيرة بين الأقطاب البارزة ، مما يؤدى إلى خفض قيمة السماح المغناطيسى لمسار الفيض فى المحاور المتعامدة ، عن قيمتة فى المحاور المباشرة (التى يتخذ خارج قسمة واحد على طول الثغرة الهوائية عند محور القطب مقياسا لها)، بالنسبة K_r . فيقل الفيض المغناطيسى ، الذى تنشئه مركبة القوة الدافعة المغناطيسية لرد فعل المنتج فى المحور المتعامد ، بنفس النسبة . وهذا يدعونا إلى إعتبار إزاحة محور ϕ_o ، الممثلة فى الزاوية δ ، ناشئة عن $K_r F_{Ac}$ ، الذى يساوى SQ فى هذه الحالة، بدلا من $F_{A|c}$ فى شكل (٦ — ٣) .

المعاوقة المتزامنة (Synchronous impedance) :

سبق أن ذكرنا أن الفيض المغناطيسى ϕ_A الناشىء عن ملفات المنتج ، وهو الذى يتمثل فى وجوده رد فعل المنتج ، يقوم بدور مشابه لذلك الذى يقوم به الفيض المغناطيسى المتسرب ϕ_1 ، من حيث أنه ينتج قوة دافعة كهربية مضادة ، رمزنا اليها بالرمز E_{xA} فى شكلى (٦ — ٣) و (١١ — ٣) . ونظرا لأن كل من ϕ_1 و ϕ_A فى اتفاق مرحلى مع التيار (وذلك باهمال زاوية التخلف المغناطيسى الناشئة عن وجود مفقودات حديدية فى مسار الفيض الناشىء عن التيار ، لأن هذا المسار يكون أساسا فى الهواء)، فان E_{xl} و E_{xA} تكونان فى اتفاق مرحلى معا،

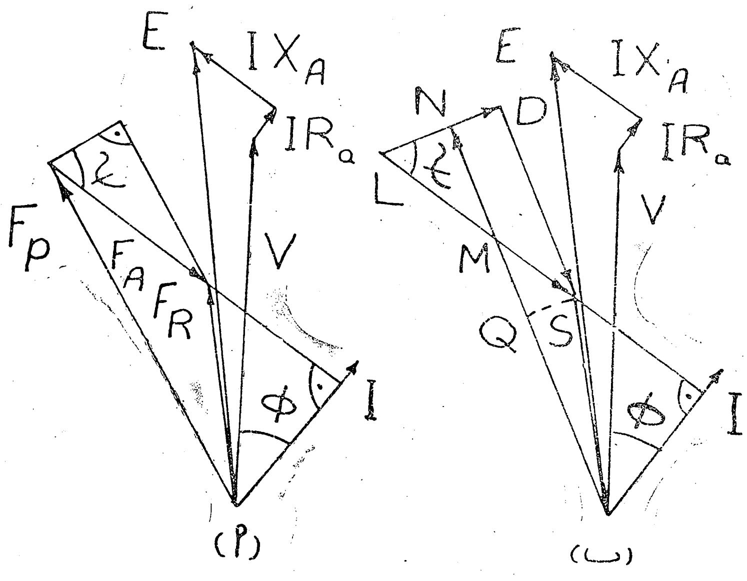
ومتخلفتين بزاوية 90 درجة كهربية عن I . وهذا يدعونا إلى اعتبار E_{XA} ، كما سبق أن اعتبرنا E_{xl} ، ناشئة عن مرور التيار I فى ممانعة مرحلية مكافئة X_A يطلق عليها اسم ممانعة رد الفعل ، كما سبقت الاشارة اليه . وبجمع هذه الممانعة ، مع ممانعة التسرب المرحلى X_l ، نحصل على ما اتفق على تسميته بممانعة التزامن المرحلية للآلة X_s . وتعطى هذه الممانعة الأخيرة (phase synchronous reactance) مع مقاومة المنتج المرحلية R_a المعاوقة المتزامنة المرحلية للآلة Z_s بحيث تصبح :

$$Z_s = R_a + J (X_A + X_l) = R_a + JX_s$$

ويمكن تحديد E_o ، ثم معامل التنظيم للآلة ، بمعرفة V و I وزاوية الاختلاف المرحلى بينهما φ ، دون الحاجة إلى التعرض لكل من AT_A و AT_p ، إذا توفرت لدينا قيمة Z_s بشقيها R_a و X_s ، كما يتضح من شكلى (٦ — ٣) و (١١ — ٣) .

نستطيع قياس معاوقة التزامن للآلة باجراء اختبارى الدائرة المفتوحة ودائرة القصر عليها . وفى الواقع أننا نحصل من نتائج هذين الاختبارين على منحنى لمعاوقة التزامن كدالة لتيار التنبيه ، أو الأمبير لفات على كل قطب من الأقطاب الرئيسية . وقد سبق شرح طريقة إجراء تجربة الدائرة المفتوحة على المولد ، للحصول على منحنى التخطيط المبين فى شكل (٧ — ٣) . ويكون إجراء إختبار دائرة القصر على المولد بطريقة مشابهة ، إذ يدار بسرعة التزامن n_s ، التى يجب الاحتفاظ بها فى هذه الحالة ثابتة طوال مدة إجراء التجربة ، وتقصر أطراف المولد مع إدخال أمبير متر فى أحد الخطوط (أو ثلاثة أمبير مترات فى الخطوط الثلاثة وأخذ متوسط القراءات) ، لقياس قيمة تيار القصر I_{sc} ، عند القيم المختلفة لتيار التنبيه I_f (التى يمكن حساب قيمة $I_f N_f$ المناظرة منها) ، ثم

يرسم منحنى خواص القصر (Short circuit characteristic) للآلة ، مع منحنى الدائرة المفتوحة على نفس الشكل ، كما هو مبين فى شكل (١٦ — ٣) .



شكل (١٢ — ٣)

ويلاحظ أن إجراء اختبار دائرة القصر يكون عند تيارات تنبيه صغيرة القيمة، وذلك حتى لاتمر فى الآلة تيارات قصر كبيرة، قد تتسبب الحرارة الناشئة عنها فى تلف الملفات . ولايجب أن تزيد قيمة أكبر تيار قصر، يمر فى الآلة فى خلال هذه التجربة، عن $1\frac{1}{2}$ من قيمة تيار الحمل الكامل للآلة ، كما يراعى أخذ القراءات ، بعد أن تزيد قيمة التيار عن الحمل الكامل ، بسرعة كبيرة ، بحيث لا يستمر مرور هذه التيارات فى الآلة أكثر من دقائق معدودة .

عندما يكون تيار التنبيه فى الآلة I_f ، فانها تعطى قوة دافعة كهربية مرحلية مقدارها E_o ، كما هو مبين فى شكل (١٦ — ٣) . فاذا قصرت أطراف الآلة والأمور باقية على ما هى عليه ، يمر فى الآلة تيار قصر مرحلى قيمته I_{sc} ، وهو

يناظر تيار التنبيه I_f على منحنى دائرة القصر المبين على نفس الشكل . ونظراً لأن قيمة الضغط الطرفى V ، على أطراف المراحل المقصورة ، يساوى صفرا ، فان القوة الدافعة الكهربية E_o تمتص بأكملها فى هبوط الضغط الناشىء عن مرور التيار I_{sc} فى المعاوقة المتزامنة Z_s . وهذا يعنى أن $E_o = I_{sc}Z_s$ ، أو

$$Z_s = \frac{E_o}{I_{sc}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٣—١٦)$$

بذلك يمكننا الحصول على القيم المختلفة للمعاوقة المتزامنة،عند تيارات التنبيه المختلفة ، ورسم المنحنى الخاص بها المبين فى شكل (١٦ — ٣) .

يتضح من دراسة منحنى المعاوقه المتزامنة أنها تظل ثابتة القيمة فى المنطقة الخطية (Straight line region) لمنحنى الدائره المفتوحة ، ثم تقل بصورة ملحوظة عند حدوث التشبع المغناطيسى فى الآلة . ولكننا مع ذلك نعتبرها ثابتة فى كثير من الأحيان (وهذا يعنى اهمال ظاهرة التشبع المغناطيسى فى الآلة) ، لأن هذا يساعدنا كثيرا فى تحليل بعض الموضوعات الخاصة بتشغيل الآلات المتزامنة تحليلا رياضيا ، يبين لنا تفاصيلها ، ويعطينا نتائج بدرجة مقبولة من التقريب بالنسبة للواقع العملى . وتكون قيمة Z_s فى الآلات التوربينية أكبر نسبيا منها فى الآلات ذات الأقطاب البارزة ، كما يتضح من عقد المقارنة بين شكلى (٦ — ٣) و (١١ — ٣) . وقد يبلغ هبوط الضغط النسبى فى الآلات التوربينية $\left(\frac{IZ_s}{V} \; 100\right)$ حوالى 175 % فى الأنواع الحديثة منها . وهذا يساعد على حماية المولدات من تيارات القصر ، التى قد تنشأ فى مجموعات القوى (power systems) التى تغذيها مثل هذه المولدات ، بسبب حدوث خطأ (fault) فى المجموعة . لذلك يندر حماية هذه المولدات بمتممات زيادة الحمل

(overload relays) .

طرق تعيين معامل التنظيم :

يعتبر معامل التنظيم من المواصفات الهامة للآلة ، التى تحتاج كثيرا إلى تحديدها ، وخصوصا فيما يتعلق بتنظيم ضغطها (Voltage control) ، أو حمايتها (Protection) ، أو تشغيلها على التوازى (parallel running) مع آلات أخرى . وتختلف طرق تعيين معامل التنظيم على حسب المعلومات المتوفرة لدينا عن الآلة ، التى قد تكون عبارة عن بيانات التصميم الواردة من المصنع ، أو نتائج اختبارات جرت عليها فى المصنع ، أو قمنا باجرائها بأنفسنا فى المعمل . ونستطيع فى بعض الأحيان ، إذا توافرت الظروف المناسبة ، تحميل الآلة بالمواصفات المطلوبة ، وقياس الضغط مع الحمل ، وبدون الحمل ، حتى يمكن حساب معامل التنظيم من القراءات الفعلية .

وفيما يلى عرض للطرق المختلفة التى تتبع لتعيين معامل التنظيم ، باستخدام بيانات التصميم ، أو نتائج الإختبارات ، أو كليهما معا .

١ — طريقة الامبير لفات البسيطة (simple ampere — turn method)

نعتمد فى هذه الطريقة على المعلومات التى نستطيع أن نرسم بها الجزء من مخطط المتجهات، الخاص بالحصول على AT_p بمعلومية AT_A و AT_R ، كما ورد فى شكل (٦ — ٣) . ونحتاج فى هذه الحالة إلى منحنى الدائرة المفتوحة عند سرعة التزامن n_s ، الذى نحصل عليه مع بيانات التصميم ، أو باجراء تجربة الدائرة المفتوحة على الآلة ، وهو يعطينا قيمة AT_R المناظرة للضغط V فى هذه الحالة . كما نحتاج إلى قيمة AT_A ، التى نحصل على قيمة تقريبية لها من منحنى خواص القصر للآلة، وذلك باعتبارها مساويه للامبير لفات AT_{f1} اللازمة لإعطاء تيار قصر يساوى

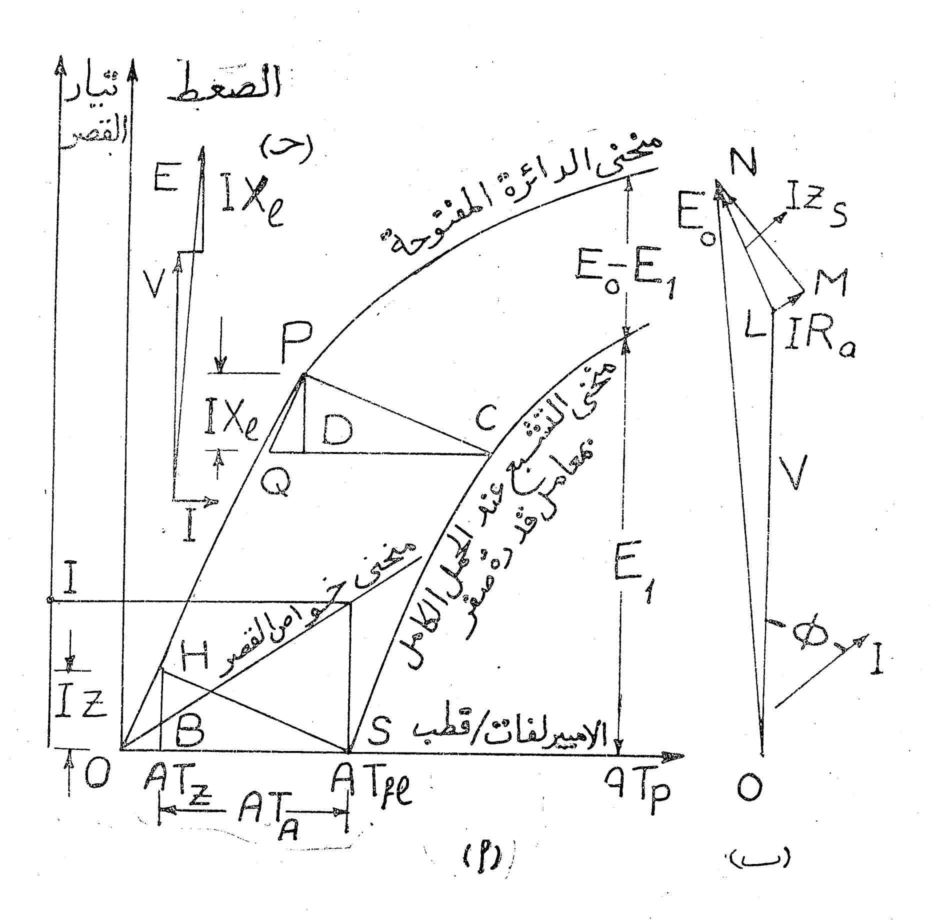
تيار الحمل الكامل I ، كما هو مبين فى شكل (١٦ — ٣) . برسم F_A و F_R وبينهما زاوية ($90 + \phi$) نحصل على F_p ، وقد سبق أن شرحنا كيف يتم الحصول على قيمة E_o ، ثم معامل التنظيم ε ، باستخدام هذه المعلومات ، عند شرح طريقة رسم مخطط المتجهات الذى جاء فى شكل (٦ — ٣) . وتعطى هــذه الطريقة فى الواقع أرقاما لمعامل التنظيم تقل عن القيمة الحقيقية فى الآلات العادية .

٢ — طريقة رد فعل المنتج (Armature teaction method) :

نحتاج فى هذه الحالة إلى المعلومات اللازمة لرسم مخطط المتجهات الخاص بالأمبير لفات كما ورد فى شكل (٦ — ٣) ، بالنسبة للآلات التوربينية ، وكما ورد فى شكل (١١ — ٣) ، بالنسبة للآلات ذات الأقطاب البارزة . وتعتبر هذه الطريقة فى الواقع تطبيق مباشر لرسم كل من هذين المخططين .

ويمكن استخدام المعادلة (١ — ٣) أو (٢ — ٣) لحســاب قيمة AT_A ، لو توفرت بيانات التصميم اللازمة ، كما يمكن استخدام منحنى خواص القصر للحصول على AT_A على النحو التالى : نحدد هبوط الضغط IZ فى المعاوقة المكونة من مقاومة المنتج المرحلية R_a وممانعة التسرب المرحلية X_l ، ونوجد الأمبير لفات AT_z اللازمة لإعطاء الضغط المعادل لها على منحنى الدائرة المفتوحـــة ، فتكون قيمة AT_A هى الفرق بين AT_{fl} و AT_z ، كما هو مبين فى شكل (١٢ — ٣ أ) .

عند إيجاد معامل التنظيم بهذه الطريقة تعدل أوضاع المتجهات أحيانا، بحيث تكون F_R فى إتجاه E و F_A عمودية على إتجاه I ، كما هو مبين فى شكل (١٢ — ٣ أ ، ب) بالنسبة لنوعى المولدات .



شكل (١٣ — ٣)

٣ — طريقة المعاوقة المتزامنة (Synchronous impedance method)

نحتاج فى هذه الحالة إلى منحنى الدائرة المفتوحة ومنحنى خواص القصر لحساب قيمة Z_s كما سبق شرحه . كما نحتاج إلى قيمة R_a المقاومة المرحلية الفعالة لملفات المنتج ، وقد نحصل عليها مع بيانات التصميم أو بالتجربة . تحسب قيمة ممانعة التزامن المرحلية من العلاقة $X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2}$ ، ثم تحسب قيمة E_o بالرجوع إلى شكلى (٦ — ٣) ، (١١ — ٣) على النحو التالى :

$$E_o = \sqrt{(V\cos\phi + IR_a)^2 + (V\sin\phi + IX_s)^2}$$

ومن ثم يمكن حساب معامل التنظيم . هذا ونظرا لأن قيمة Z_s ليست ثابتة، فان قيمة معامل التنظيم تختلف على حسب Z_s التى نستخدمها ، والتى تكون عادة عند تيار التنبيه المناظر للامبير لفات AT_{fl} . وتعطى هذه الطريقة أرقاما لعامل التنظيم أكبر من حقيقتها بكثير فى الواقع .

٤ — طريقة منحنى التشبع بعامل قدره صفر :

(Zero — Power — Factor saturation curve method)

نحتاج فى هذه الحالة إلى منحنى الدائرة المفتوحة ، ومنحنى التشبع عند الحمل الكامل بعامل قدره يساوى الصفر ، الذى نحصل عليه بأخذ قراءات الضغط المرحلى على أطراف الآلة وتيار التنبيه (الذى نحسب منه $N_f\ I_f$ الأمبير لفات على كل قطب) عند إدارة الآلة بسرعة التزامن n_s ، وتحميلها بالتيار الثابت القيمة I عند معامل قدرة متأخر يساوى الصفر (يكون ذلك بتوصيل ممانعة حثية ثلاثية المراحل على أطراف الآلة تأخذ تياراً مرحلياً مقداره I أمبير . ويضبط التيار على قيمة الحمل الكامل الثابتة I بتغيير قيمة الممانعة كلما تغيرت قيمة تيار التنبيه) .

يبين شكل (١٣ — ٣ أ) منحنى الدائرة المفتوحة ، ومنحنى التشبع عند الحمل الكامل بمعامل قدرة متأخر صفر . إذا فرضنا أنه عندما تكون قيمة الأمبير لفات على كل قطب من أقطاب الآلة AT_p ، تكون قيمة القوة الدافعة الكهربية E_o على المنحنى الأول ، و E_1 على المنحنى الثانى ، فلابد أن قيمة الضغط الطرفى V ، مع نفس تيار الحمل I عند معامل قدرة متأخر ، يقع بين الصفر والواحد الصحيح ، تقع بين E_o و E_1 . لكى نحصل على قيمة V ، عند معامل قدرة معين

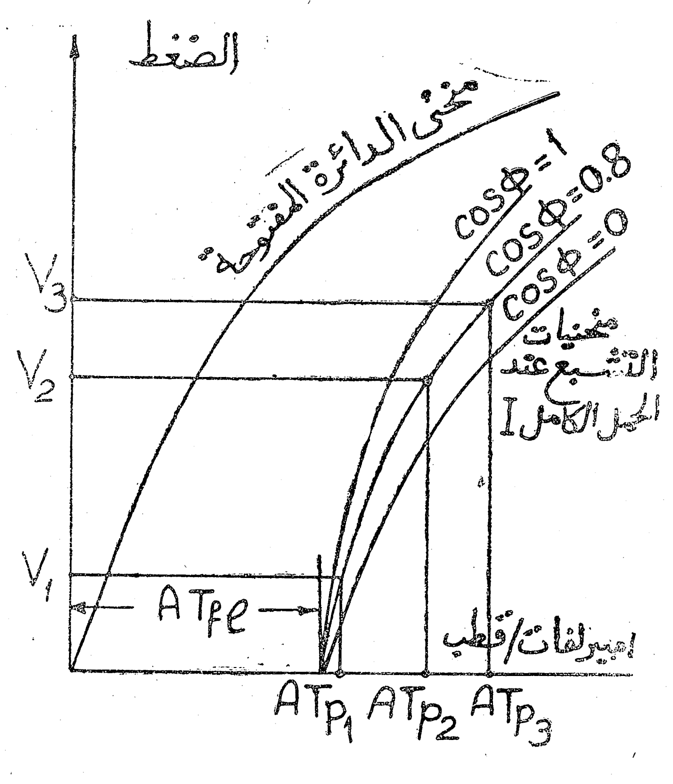
$\cos \phi$ ، نعتبر هبوط الضغط IZ_s فى معاوقة التزامن Z_s ثابت القيمة ويساوى $E_1 - E_o$ ، ويختلف وضعه المرحلى على حسب زاوية الاختلاف المرحلى ϕ بين تيار الحمل الكامل بقيمته الثابتة I والضغط الطرفى V . وهذا يعنى أننا نعتبر Z_s , I , E_o (وبالتالى IZ_s) ذات قيم ثابتة ومعروفة ، وأن V تتغير على حسب تغير ϕ .
يبين شكل (١٣ — ٣ب) كيف نحصل على قيمة V باتباع الخطوات الآتية : نرسم مركبة الضغط IR_a ، التى تعادل هبوط الضغط فى المقاومة المرحلية للفات المنتج ، بحيث تصنع الزاوية ϕ مع الاتجاه الرأسى ويمثلها المتجه LM . نقيم عمودا من M على LM ، ونحدد عليه النقطة N ، بحيث يمثل المتجه LN مركبة الضغط IZ_s اللازمة لمعادلة هبوط الضغط فى معاوقة التزامن المرحلية للآلة . نرسم من N المتجه ON ، الذى يقع طرفه O على المستقيم الرأسى LO ، ويمثل طوله الضغط E_o . فيكون المتجه OL ممثلا للضغط الطرفى V ، الذى تتحدد قيمته بناء على ذلك.
ومن ثم يمكننا حساب قيمة معامل التنظيم $\frac{E_o - V}{V} = \varepsilon$.

ويلاحظ أننا فى الواقع استخدمنا فى هذه الطريقة المعاوقة المتزامنة ، وهبوط الضغط الناشىء عنها مرة أخرى ، ولكن تمتاز الطريقة ، فى هذه المرة عن المرة السابقة ، فى أن هبوط الضغط IZ_s يقاس فى ظروف هذا الحمل الكامل فعلا ، مما يجعلنا نحصل على نتائج أقرب ما تكون إلى الواقع العملى . لذلك فاننا نعمد فى بعض الأحيان ، عند توافر المعلومات اللازمة ، إلى رسم منحنى التشبع عند الحمل الكامل بمعامل قدرة صفر أولا ، بطريقة بواتيه ، ثم نحسب معامل التنظيم بالمعلومات المستخرجة منه ، كما سبق شرحه أعلاه .

طريقة بوانييه لرسم منحنى التشبع عند حمل معين بعامل قدره صفر :

(The Potier method of determining load characteristics at zero power factor) :

يمكننا بمعرفة البيانات الكاملة للتصميم حساب قيم AT_A , X_A , X_s^A , R_a , Z_s ، وكذلك رسم منحنى الدائرة المفتوحة للآلة . وفى هذه الحالة نستطيع رسم منحنيات الحمل (load characteristics) المختلفة ، بمعاملات قدرة مختلفة ، بالاستفادة من الطرق المختلفة لحساب معامل التنظيم على النحو التالى : نفرض أننا نريد رسم منحنى التشبع عند حمل معين I بعامل قدرة معين cos φ (متقدم



شكل (١٤ — ٣)

أو متأخر) . نفرض قيما مختلفة للضغط ... ، V_3 ، V_2 ، V_1 ونحدد عند كل قيمة منها ، باحدى الطرق السابقة ، وباستخدام بيانات التصميم المتوفرة لدينا ، قيمة الأمبير لفات المناظرة على كل قطب AT_{p1} و AT_{p2} و AT_{p3} . ويتحدد المنحنى المطلوب على نفس محاور منحنى الدائرة المفتوحة بالاحداثيات (V_1 , AT_{p1}) ، (V_2 , AT_{p2}) ، (V_3 , AT_{p3}) ... الخ ، كما هو مبين فى شكل (١٤ — ٣) . وبنفس الطريقة يمكننا أن نحصل على منحنى التشبع عند الحمل I' بمعامل قدرة $\cos\phi'$ بالاحداثيات (V_1 , AT'_{p1}) ، (V_2 , AT'_{p2}) ، (V_3 , AT'_{p3}) . . . الخ ويلاحظ أن هذه المنحنيات جميعا تشترك فى نقطة واحدة هى نقطة القصر ، التى تكون قيمة الضغط الطرفى المرحل فيها يساوى صفرا ، ويكون معامل القدرة المتأخر عندها يساوى الصفر تقريبا أيضا ، بسبب وجود ممانعة التزامن الحثية ذات القيمة الكبيرة بالنسبة لمقاومة ملفات المنتج $\left(\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_a} \simeq \frac{\pi}{2} \right)$. ونحن نهتم من بين كل هذه المنحنيات اهتماما خاصا بمنحنى التشبع عند الحمل الكامل بمعامل قدرة صفر ، حيث يمكن إجراء التجربة الخاصة به وأخذ قراءاتها بسهولة فى المعمل ، كما أنه يمكننا رسم هذا المنحنى بمعرفة قراءة واحدة عليه (الضغط الطرفى مع الأمبير لفات المناظرة على كل قطب ، ويمكن حسابها أيضا من بيانات التصميم كما هو مبين أعلاه) الى جانب قراءة تجربة دائرة القصر عند نفس تيار الحمل I ، وذلك على النحو المبين فى شكل (١٣ — ٣) ، كما يأتى : النقطة S مأخوذة من تجربة دائرة القصر ، بمعنى أن OS يساوى AT_{f1} ، وهى الأمبير لفات اللازم وجودها على كل قطب من الأقطاب الرئيسية للآلة لكى يمر فيها تيار الحمل الكامل المرحلى عند قصر أطرافها . ويكون الجزء SB مساويا AT_A ، وهى أمبير لفات رد فعل المنتج ، والجزء OB مساويا

AT_z ، وهى الامبير لفات اللازمة لإنتاج مركبة الضغط IZ التى تعادل هبوط الضغط فى كل من المقاومة المرحلية ، ومانعة التسرب المرحليه . ويمكن تحديد S أولا ، ثم كل من B ، H من بيانات التصميم مباشرة ، ولكننا نحتاج فى حالتنا هذه إلى نقطة أخرى على منحنى التشبع عند الحمل الكامل بمعامل قدره صفر ، وهى النقطة C ، لتحديد كل من H , B . يظل رد فعل المنتج ، وكذلك هبوط الضغط IZ ، كما هو تقريبا عند النقطة C ، نظراً لعدم تغير قيمة التيار أو معامل القدرة . لذلك نرسم CD_Q أفقيا من C بحيث يكون $AT_A + AT_z = CQ = OS$.

نرسم من Q المنحنى (أو الخط المستقيم فى الواقع) الذى يوازى الجزء الأول من منحنى الدائرة المفتوحة ابتداء من O (الذى نستطيع أن نعتبره خطا مستقيما) فتتحدد النقطة P على هذا المنحنى . نسقط العمود PD على CQ لتحديد النقطة D ، حيث يكون QD مساويا AT_z ويكون CD مساويا AT_A . بذلك يمكن تحـــــديد كل من H , B حيث $AT_z = OB = QD$ ، وحيث $BS = DC = AT_A$. بذلك يكون $PD = IX_l$, $HB = IZ$ ، ويكون المثلث CQP مساويا ومشابها تقريبا للمثلث SOH . ويمكن برسم مثلثات مماثلة للمثلث PQC ، وتقع رءوسها على منحنى الدائرة المفتوحة ، تحديد نقط أخرى مثل C ، تقع على أطراف قواعدها ، وعلى منحنى التشبع المطلوب فى نفس الوقت . وهذه هى طريقة بواتييه فى رسم منحنى التشبع عند حمل معين بمعامل قدرة صفر ، ثم استخدام المعلومات التى نحصل عليها فى حساب معامل التنظيم كما سبق شرحه .

ملحوظة : أن تكوين المثلث PQDC يتم فى الواقع على الأساس الآتى : يتضح من شكل (١٣ — ٣ح) أننا نستطيع أن نعتبر أن الفرق العددى بين E و V

هو IX_1 تقريبا . فاذا كانت النقطة P على منحنى الدائرة المفتوحة تمثل الضغط E ، فان الخط DC يكون فى مستوى الضغط V ، إذا كان طول PD يساوى IX_1 . فاذا كان DC يمثل الامبير لفات AT_A ، اللازمة لمعادلة تأثير رد فعل المنتج عند تيار الحمل المعلوم ، فان النقطة C تقع على منحنى التشبع المطلوب . ونظراً لان طول IX_1 يساوى تقريباطول IZ فى المعتاد ، فان التفرقة بينها لامعنى لها مع التقريبات الكثيرة المشار اليها .

أما بالنسبة لتكوين المثلث OHS فمن الواضح أن $IZ = E$ فى هذه الحالة (دائرة القصر) لان V يساوى صفراً ، فيكون الفرق العددى بين E , V هو IZ الذى يمثله HB ، كما هو مبين فى شكل (١٣ — ٣ أ) . لذلك فاننا نستطيع رسم مثلث بواتييه بمعلومية $PD = IX_1$ أو $IZ = HB$ ، على حسب المعلومات الموجودة .

امثلة محلولة على الباب الثالث

1 — a 3— phase stator has 4 slots per pole per phase and there are 4 conductors in series per slot. Plot to scale the distribution of magnetomotive force in the airgap (a) when the current in phase I is maximum; (b) $\frac{\pi}{6}$ later than (a) ; (c) $\frac{\pi}{2}$ later than (a) . The maximum current per phase is 10 A, and the variation with time is sinusoidal. Full pitch coils are being used.

يبين شكل (١ — ٣) حل الجزء (a) ، غاية ما فى الامر أننا نحتاج إلى إيجاد قيمة F_m ، حتى يمكن تحديد مقياس الرسم ، وذلك على النحو التالى :

$$q = 4 \ , \ u = 4 \ , \ \sqrt{2}\, I = 10 \ , \ \alpha = \frac{180}{12} = 15^\circ$$

$$k_w = k_d = \frac{\sin 30}{4 \sin 7.5} = 0.959$$

$$F_m = 4 \times 4 \times \frac{10}{2} \times 0.959 = 76.6 \text{ أمبير لفة/قطب}$$

بالنسبة لحل الجزء (b) يعدل وضع المتجه F_1 (وتبعا لذلك F_2 ، F_3) ، بحيث يصنع الزاوية $\frac{\pi}{6}$ متقدما فى إتجاه الدوران ، ويعاد رسم منحنى القوة الدافعة المغناطيسية للفات المنتج بنفس الطريقة السابقة ؛ ويكرر ذلك مرة أخرى ، مع تقديم F_1 (ومعه F_2 ، F_3) الزاوية $\frac{\pi}{2}$ فى إتجـــاه الدوران ، للحصول على حل الجزء (c) .

2 — A 1500 K V A, 3 phase, star connected, 50 c/s synchronous generator runs at 375 r.p.m. and has a terminal voltage of 3300 V at full load. The open circuit characteristic of the machine at normal speed is as follaws :

Induced E.M.F, volts/phase	1500	1900	2100	2300	2500
Field current, amps	56	81	106	158	300

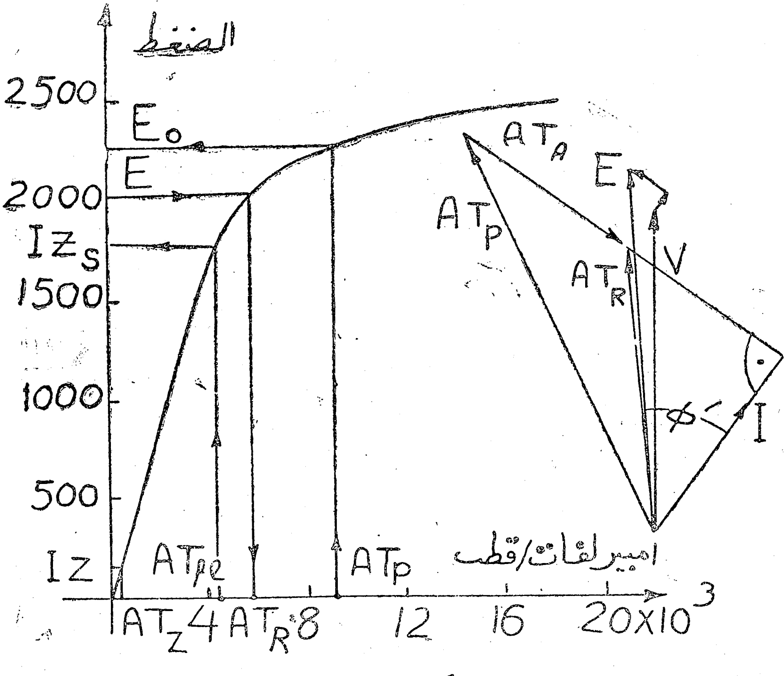
The field winding has 60 turns per pole. The armature has a leakage reactance drop of 8 % and a resistive drop of 1 %. The stator has 144 slots each containing 4 conductors. Find the regulation for full load 0.8 power factor lagging.

نحصل أولا على منحنى الدائرة المفتوحة بدلالة الأمبير لفات على كل قطب

بدلا من تيار التنبية I_f كما هو معطى ، وذلك بضرب تيارات التنبيه فى N_f I
: $N_f = 60$

E_{ph}	:	1500	1900	2100	2300	2500
$N_f I_f$	:	3360	4860	6360	9480	18000

نرسم منحنى الدائرة المفتوحة ، كما هو مبين فى شكل (١٥ — ٣) .



شكل (١٥ — ٣)

$$V = \frac{3300}{\sqrt{3}} = 1'05 \quad V \quad , \quad p = \frac{60 \times 50}{375} = 8 \quad ,$$

$$2p = 16$$

$$q = \frac{144}{16 \times 3} = 3 \quad , \quad \alpha = \frac{360 \times 8}{144} = 20^\circ$$

$$k_w = k_d = \frac{\sin 30}{3 \sin 10} = 0.96$$

$$\frac{I R_a}{V} \times 100 = 1 \quad , \quad IR_a = 19.05 \text{ V}$$

$$\frac{IX_l}{V} \times 100 = 8 \quad , \quad IX_l = 152.4 \text{ V}$$

$$T_{ph} = \frac{4 \times 144}{2 \times 3} = 96$$

$$I = \frac{1500 \times 1000}{\sqrt{3} \times 3300} = 262 \quad A$$

$$AT_A = 1.35 \times \frac{96}{8} \times 262 \times 0.96 = 4050$$ أمبير لفة/قطب

باستخدام طريقة رد فعل المنتج نحصل على AT_R (المناظرة للضغط E) من منحنى الدائرة المفتوحة ، ثم نحصل على AT_p من مخطط المتجهات ، كما هو مبين فى شكل (١٥ — ٣) ، وأخيرا نحصل على E_o من منحنى الدائرة المفتوحة ، كما هو مبين فى شكل (١٥ — ٣) بالأسهم .

$$E = \sqrt{(V\cos\phi + IR_a)^2 + (V\sin\phi + IX_l)^2}$$

$$= \sqrt{(1525 + 19.06)^2 + (1143 + 152.4)^2} = 2017 \quad V$$

$$\phi'(E, I) = \tan^{-1}\frac{1295.4}{1544.05} \simeq 40^\circ$$

$AT_R = 5700$ أمبير لفة/قطب

$AT_p = 9000$ أمبير لفة/قطب

$E_o = 2275$ V

$$\varepsilon = \frac{2275 - 1905}{1905} = 0.194 = 19.4\ \%$$

يمكننا حل هذه المسأله باستخدام طريقة المعاوقة المتزامنة على النحو التالى :

$$IZ = \sqrt{(IR_a)^2 + (IX_l)^2} = \sqrt{(19.05)^2 + (152.4)^2} = 164V$$

$$AT_z = 320 \ , \ AT_{fl} = AT_A + AT_z = 4370$$

بايجاد الضغط المناظر لـ AT_{f_1} من منحنى الدائرة المفتوحـة كما هو مبين فى شكل (١٥ — ٣) نحصل على مركبة الضغط IZ_s ، اللازم لمادلة هبوط الضغط فى معاوقة التزامن ، ومن ثم نحصل على Z_s وكذلك IX_s ، كما يأتى .

$$IZ_s = 1780\ V \quad , \quad Z_s = \frac{1780}{262} = 6.8\ \ \Omega$$

$$IX_s = \sqrt{(IZ_s)^2 - (IR_a)^2} = \sqrt{(1780)^2 - (19.05)^2} \simeq 1780$$

$$E_o = \sqrt{(V\cos\phi + IR_a)^2 + (V\sin\phi + IX_s)^2}$$

$$= \sqrt{(1525 + 19.06)^2 + (1143 + 1780)^2} \simeq 3300\ V$$

$$\varepsilon = \frac{3300 - 1905}{1905} = 0.75 = 75\ \%$$

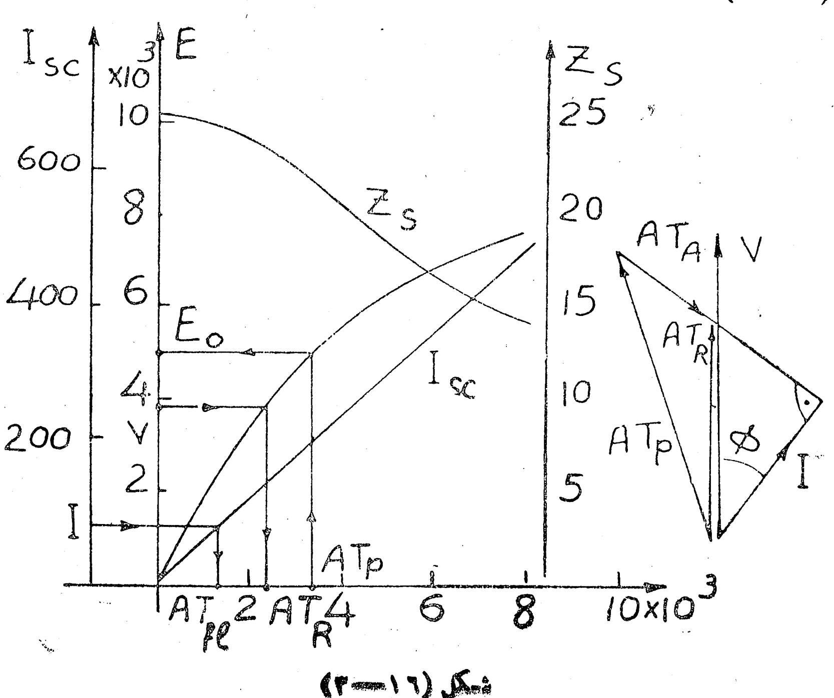
وهى قيمة مبالغ فيها جداً، وأكبر بكثير من الحقيقة ، كما سبق ذكره عند شرح هذه الطريقة . وتنشأ هذه المبالغة بسبب رصد IZ_s على الجزء المستقيم من منحنى الدائرة المفتوحة ، بينما يجب أن تكون Z_s محسوبة على الجـــزء المنحنى ، أى فى منطقة التشبع ، لان هذا أقرب إلى الواقع العملى .

3 — A 1000 KVA, 6600 V, 3 phase, star connected synchronons generator has the following open and short circuit characteristics :

Field amp. turns	0	1100	3300	5500	7700
Induced E.M.F/phase	0	1880	4950	6600	7520
Short circuit curreut	0	75	225	375	525

Find the regulation of the machine when running on full load 0.8 power factor lagging.

نستخدم طريقة الأمبير لفات البسيطة للحصول على معامل التنظيم ، ولا نحتاج فى هذه الحاله إلى هبوط الضغط فى كل من X_l و R_a ، كما كان الأمر فى المثال السابق ، لأننا نحصل من منحنى خواص القصر على AT_{fl} لـ I ، وهى التى تساوى مجموع AT_A و AT_x ، بحيث تكون AT_R مناظرة للضغط V . نحصل على AT_p من مخطط المتجهـــات باستخدام AT_R و AT_{fl} ، كما هـو مبين فى شـكل (١٦ــ٣) .



شكل (١٦ــ٣)

$$V = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3810 \text{ V} \quad , \quad AT_R = 2400$$

$$I = \frac{1000 \times 1000}{\sqrt{3} \times 6600} = 87.5 \text{ A} \; , \; AT_{fl} = 1285$$

$$AT_p = 3350 \quad , \quad E_o = 5000 \text{ V}$$

$$\varepsilon = \frac{5000 - 3810}{3810} = 0.304 = 30.4 \;\%$$

يمكن حساب معامل التنظيم فى هذه الحالة أيضا ، كما سبق فى المثال الأول ، باستخدام طريقة المعاوقة المتزامنة . ونستطيع أن نحصل على نتيجة أفضل فى هذا المثال باستخدام معاوقة التزامن المحسوبة فى منطقة التشبع ، ونحصل عليها ، كما فى شكل (١٦ — ٣) ، بقسمة قراءات منحنى الدائرة المفتوحة على قراءات منحنى خواص القصر المناظرة على النحو التالى :

AT	:	1100	3300	5500	7700
Z_s	:	25	22	17.65	14.35

نستطيع أن نهمل تأثير R_a (لعدم وجودها فى المسألة) ، ويتضح من المثال السابق أن ذلك لن يغير فى النتيجة شيئا .

$$IX_s \cong IZ_s = 14.35 \times 87.5 = 1256 \quad \text{V}$$

$$E_o \cong \sqrt{(V\cos\phi)^2 + (V\sin\phi + I X_s)^2}$$

$$\cong \sqrt{(3048)^2 + (2286 + 1256)^2} \cong 4680 \text{ V}$$

$$\varepsilon = \frac{4680 - 3810}{3810} = 0.222 = 22.2 \;\%$$

وهى أقل من القيمة التى حصلنا عليها أولا . وقد نشأ ذلك نتيجة لاستخدامنا

أقل قيمة لـ Z_s فى منطقة التشبع ، بينما حصلنا فى المثال الأول على قيمة عالية جدا ، نتيجة لإستخدامنا أعلى قيمة لـ Z_s فى منطقـــة الخط المستقيم لمنحنى الدائرة المفتوحة . ويتركز عيب طريقة معاوقة التزامن ، فى الحصول على معامل التنظيم ، على هذا التذبذب الكبير فى النتائج التى تعطيها ، على حسب قيمة Z_s التى نستخدمها ، حيث تختلف قيمة Z_s اختلافا كبيرا فى منطقة الحساب ، كما يظهر فى شكل (١٦ — ٣) . لذلك يفضل عدم استخدام هذه الطريقة للحصول على معامل التنظيم .

وفى الواقع أننا لا نلجأ إلى استخدام Z_s (أو X_s) ، فى الحسابات الخاصة بالآلات المتزامنة ، إلا عند عمل تحليل نوعى (qualitative analysis) ، لكى نحصل على نتائج نوعية (qualitive results) ، وهى نتائج تبين لنا كيف تسير الأمور فقط ، وفى أى إتجاه تتطور العلاقة بين الحدود المختلفة ، بصرف النظر عن النتائج الكمية (quantative results) ، التى تربط بين هذه الحدود ربطا حسابيا صحيحا ، عند عمل تحليل كمى (quantative analysis) ، كما سنفعل فى الباب التالى . فاذا أردنا تحويل النتائج النوعية إلى نتائج كمية سليمة ، يجب علينا قياس Z_s (أو X_s) تحت ظروف التشغيل الموجودة .

4 — A 3-phase, salient pole synchronous generator is rated at 1200 KVA and 6600 Volts. The armature has 9 slots per pole, each containing 6 conductors, and the open circuit characteristic of the machine was obtained by the following points at normal speed;

phase e.m.f. :	2890	3460	4040	4610	V
Exciting current :	17	2.15	28	41	A

The rotor has 125 turns per pole and the leakage reactance drop in the armature is 10 % of normal voltage. assuming a ratio of pole arc to pole pitch of

0.67, find the regulation for full load, 0.8 power factor lagging.

تستخدم فى هذه الحالة طريقة رد فعل المنتج برسم مخطط المتجهات للآلة ذات الأقطاب البارزة ، كما فى شكل (١٢—٣ب). ونطبق المعادلة (١٥—٣) للحصول على كل من α_c و α_d بمعرفة $\alpha_i = \frac{2}{3}$ (نحصل على نفس القيم تقريبا من شكل (١٠—٣)) :

$$\alpha_c = \frac{\frac{2}{3}\pi - \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{3}}{4\frac{\sqrt{3}}{2}} = 0.45 \quad ,$$

$$\alpha_d = \frac{\frac{2}{3}\pi + \frac{\sqrt{3}}{2}}{4\frac{\sqrt{3}}{2}} = 0.855$$

$$I = \frac{1200 \times 1000}{\sqrt{3} \times 6600} = 105 \text{ A} \ , \ V = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3810$$

$$\alpha = \frac{360 \times p}{S} = \frac{180}{3q} = \frac{180}{9} = 20^\circ \quad ,$$

$$q = \frac{9}{3} = 3$$

$$k_w = k_d = \frac{\sin 30}{3 \sin 10} = 0.96$$

$$\frac{T_{ph}}{p} = \frac{3p \times 2p\,u}{2 \times 3 \times p} = qu = 3 \times 6 = 18$$

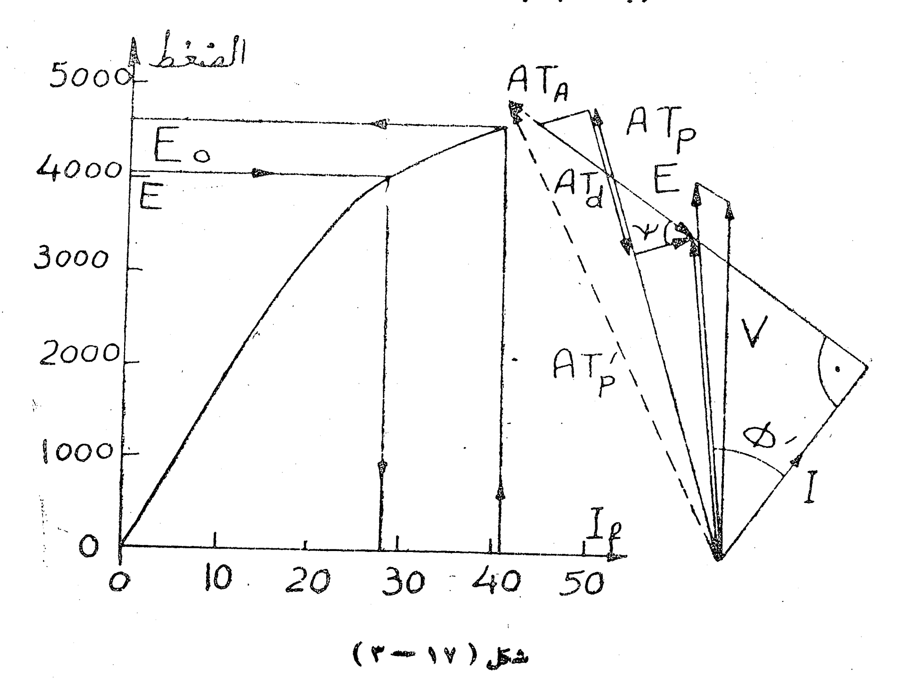
$$AT_A = 1.35 \times 18 \times 105 \times 0.96 = 2445$$ أمبير لفه/قطب

$$AT_c = \alpha_c AT_A = 0.45 \times 2445 = 1100$$

$$AT_d = \alpha_d\, AT_A = 0.855 \times 2445 = 2090$$

يهمل تأثير R_a ويؤخذ IX_l من طرف V عموديا على I ، وبذلك نجد أن :

$$E = \sqrt{(V \cos \phi)^2 + (V \sin \phi + I X_l)^2}$$



شكل (١٧ — ٣)

$$IX_l = 0.1\ V = 381\ V$$

$$E = \sqrt{(3048)^2 + (2286 + 381)^2} = 4050$$

تيار التنبيه المناظر لـ E يساوى 28 أمبير ، وبضربه فى 125 عدد اللفات على كل قطب نحصل على AT_R وتساوى 3500 أمبير لفه على كل قطب . يرسم مخطط المتجهات بمعرفة AT_R و AT_c و AT_d ، كما سبق شرحه بالنسبة لشكل (١١ — ٣)، والشكل المعدل (١٢ — ٣ب) ، وذلك كما هو مبين فى شكل (١٧ — ٣) :

$$\phi' = \tan^{-1} \frac{2667}{3048} \cong 41^\circ$$

$$AT_p = 5100 \quad , \quad I_f = \frac{5100}{125} = 40.8\ A \quad E_o = 4600\ V$$

$$\varepsilon = \frac{4600 - 3810}{3810} = 0.207 = 20.7\ \%$$

يمكن حل المسألة حلا تقريبيا ، دون الحاجة إلى استخدام α_c و α_d ، وذلك باهمال بروز الأقطاب (neglect effect of saliency) ، وهذا يعنى أن نرسم مخطط المتجهات على نمط مخطط متجهات الآلات التوربينية ، كما فى شكل (١٢ — ٣ أ) ، أو أن نستخدم طريقة الأمبير لفات البسيطة بمعنى آخر . يتكون مخطط متجهات الأمبير لفات فى هذه الحالة من AT_R التى حصلنا عليها ، وتساوى 3500 أمبير لفه على كل قطب ، و AT_A التى حسبناها وتساوى 2445 أمبير لفه على كل قطب ، ثم AT'_p الناتجة منهما ، وهى تساوى 5500 أمبير لفة على كل قطب (المتجه المتقطع شكل (١٧ — ٣)) . نجد أن تيار التنبيه I'_f تصبح قيمته $\frac{5500}{125} = 44.1$ ، بينما تكون $E_o = 4700$. وهذا يعطى معامل تنظيم قيمته 0.23 أو 23 % . أى أننا نحصل على قيم أعلى لتيار التنبيه ومعامل التنظيم عند اهمال بروز الأقطاب ، وهذا يفسر لنا لماذا يكون معامل التنظيم فى الآلات التوربينية أعلى منه عادة فى الآلات ذات الأقطاب البارزة المناظرة .

5 - A 5000 KVA, 6600 V, 3 — phase, star — connected alternator has a resistance of 0.075 ohm per phase. Estimate by the zero power — factor method the regulation for a load of 500 amps at power factor of (a) unity, (b) 0.9 leading, (c) 0.71 lagging, from the following open - circuit and full — load, zero — power — factor curves ;

field current amps.	32	50	75	100	140
induced line (phase) e.m.f., Volts	3100 (1795)	4900 (2840)	6600 (3815)	7500 (4340)	8300 (4800)
saturation curve zero p.f., Volts	0	1850 (1069)	4250 (2455)	5800 (3350)	7000 (4045)

Find also the armature leakage reactance and the armature reaction ampere turns at full load, if there are 150 turns on each pole.

القيم المعطاة بين قوسين للضغط المرحلى المناظر ، وهى جزء من الحل ، إذ أن المعطى فى رأس المسأله هو قيم الضغط الخطى ، ويجب أن يكون الحل دائما على أساس القيم المرحلية ، حتى لايحدث خطأ . نحصل على IZ_s من شكل (١٨—٣) .

$$V = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3815 \text{ V} \quad , \quad IZ_s = 825 \text{ V}$$

$$I = \frac{5000 \times 1000}{\sqrt{3} \times 6600} = 437 \text{ A}$$

$$Z_s = \frac{825}{437} = 1.89 \ \Omega \quad ,$$

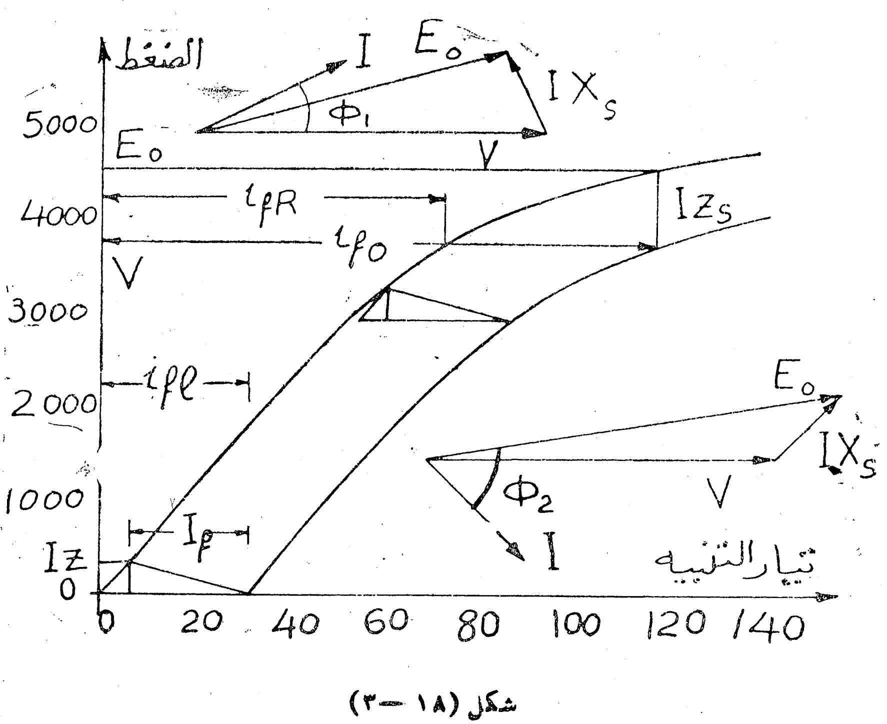
$$X_s = \sqrt{(1.89)^2 - (0.07)^2} \simeq 1.89 \ \Omega$$

(a) unity p.f. : $E_o = \sqrt{(V + IR_a)^2 + (IX_s)^2}$,

$I = 500$ A

$$E_o = \sqrt{(3815 + 37.5)^2 + (950)^2} = 3977$$

$$\varepsilon = \frac{3970 - 3815}{3815} = 0.0407 = 4.07\ \%$$



شكل (١٨ — ٣)

(b) 0.9 leading

نحل هذا الجزء بالرسم كما هو مبين فى شكل (١٨ — ٣) حيث :

$\Phi_1 = 25° \ 45'$, $E_o = 3500$ V

$$\varepsilon = \frac{3500 - 3815}{3815} = -0.0825 = -8.25\ \%$$

(c) 0.71 lagging

نحل هذا الجزء بالرسم أيضا هو مبين فى شكل (١٨ — ٣) حيث :

$\Phi_2 = 45°$, $E_o = 4550$

$$\varepsilon = \frac{4550 - 3815}{3815} = 0.193 = 19.3\ \%$$

نحقق هذه النتيجة بالحساب كما يأتى :

$$E_o = \sqrt{(V\cos\varphi + IR_a)^2 + (V\sin\varphi + IX_s)^2}$$

$$= \sqrt{(2690 + 37.5)^2 + (2690 + 950)^2} = 4557$$

$$\varepsilon = \frac{4550 - 3815}{3815} = 0.193 = 19.3\ \%$$

للحصول على ممانعة التسرب ورد فعل المنتج ننشىء مثلث بوانييه ، بالطريقة التى شرحناها سابقا ، وكما هو مبين فى شكل (١٨ — ٣) ، فنحصل على النتائج الآتية :

$$IZ = 350\ \ V\ \ ,\ \ Z = \frac{350}{437} = 0.8\ \ \Omega$$

$$X_l = \sqrt{Z^2 - R^2_a} \simeq 0{,}8$$

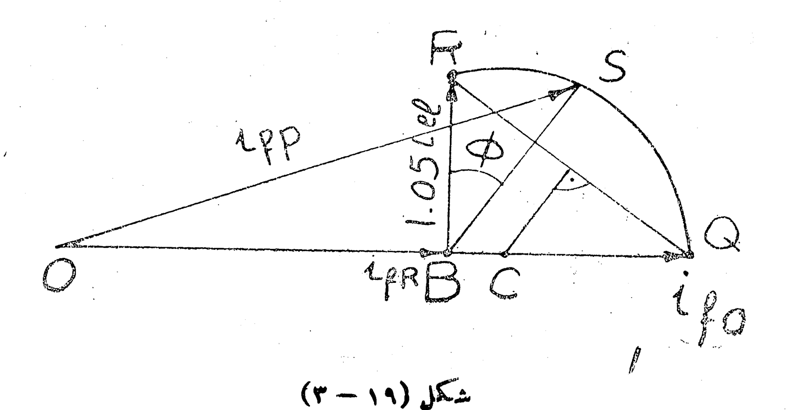
تيار التنبيه المناظر لرد فعل المنتج عند الحمل الكامل :

$$I_f = 32 - 6 = 26\ \ A$$

$AT_A = 26 \times 150 = 3900$ أمبير لفة/قطب

ملحوظه : يستخدم لإيجاد معامل التنظيم فى مثل هذه المسأله مخطط يطلق عليه اسم المخطط السويدى (swedish diagram) ، ويتم تكوينه واستخدامه ، كما هو مبين فى شكل (١٩ — ٣) ، على النحو التالى :

i_{fR} تيار التنبيه المناظر للأمبير لفات AT_R ويمثله OB ، i_{fo} تيار التنبيه المناظر للامبير لفات AT_o ويمثله OQ) AT_o هى الأمبير لفات اللازمة للحصول



شكل (١٩ — ٣)

على الضغط V عند الحمل الكامل بمعامل قدره صفر) . BR يمثل $1.50\,i_{fl}$ ، وهو عمودى على OB (i_{fl} هو تيار التنبيه المناظر للامبير لفات AT_{fl}) . تعتبر النقطتان R و Q واقعتين على جزء من محيط دائرة ، يقع مركزها C على OQ . لذلك نصل QR ونقيم عمودا من منتصفه يقابل OQ فى النقطة C . للحصول على i_{fp} (تيار التنبيه المناظر للامبير لفات AT_p) عندمعامل قدرة متأخر cos ϕ ، نرسم BS بحيث يصنع الزاوية ϕ مع BR ، ويقطع قوس الدائرة RQ فى S ، فيكون OS ممثلا لتيار التنبيه المطلوب .

نحصل من شكل (١٩ — ٣) على معامل التنظيم عند الحمل الكامل (437 A)

حيث :

$$i_{fp} = 105 \text{ amps} \quad , \quad E_o = 4450 \quad V$$

$$\varepsilon = \frac{4450 - 3815}{3815} = 0.1665 = 16.65 \ \%$$

مسائل على الباب الثالث

1 — The effective resistance of a 2200 — V, 50 — cycle, 440 — KVA, 1 — Phase alternator is 0.5 Ω. On short — circuit a field current of 40 A gives the full — load current of 200 A. The electromotive force on open — circuit with the same field excitation is 1160 V.

Calculate the synchronous impedance and reactance.

2 — If a field excitation of 10 A in a certain alternator gives a current of 150 A on short — circuit and a terminal voltage of 900 V on open — circuit, find the internal voltoge drop with a load current of 60 A.

3 — A 550 — V, 55 — K V A, 1 — phase alternator has an effective resistance of 0.2 Ω. A field current of 10 A produces an armature current of 200 A on short — circuit and an electro — motive — force of 450 V on open — circuit. Calculate (a) The synchronous impedance and reactance, and (b) The full — load regulation with power factor 0.8 lagging.

4 — Determine the voltage regulation of a 2000 — V, 1 — phase alternator giving a current of 100 A at (a) unity power factor, (b) power factor 0.8 leading, and (c) power factor 0.71 lagging, from the test results : — Full — load current, 100 A, is produced on short — circuit by a field excitation of 2.5 A. An electromotive force of 500 V is produced on open

circuit by the same excitation. The armature resistance is 0.8 Ω.

5 — A 1500 K V A, 6600 — V, 3 — phase, star — connected alternator with a resistance of 0.4 Ω and reactance of 6 Ω per phase, delivers full — load current at power — factor 0.8 lagging, and normal voltage. Estimate the terminal voltage for the same excitation and load current at 0.8 power factor leading.

6) Define the voltage regulation of a synchronous generator and mention the factors which affect it.

A 1000 KVA, 3 phase, 50 c/s, star connected alternator has a voltage regulation of 25 % when its terminal voltage is 3300 V and driven at 375 r.p.m. The number of slots per pole per phase is 3 and the winding factor is 0.96. If the flux per pole is 5.81 megalines, calculate, the number of conductors per slot. Draw the short circuit characteristic of the machine assuming it to be a straight line.

7 — Explain how a rotating field is produced in a 3 phase synchronous machine.

A 3 phase, 6600 V, 12 pole, star connected synchronous generator with a total number of slots of 108 and 6 conductors per slot, gave the following open circuit characteristic at normal speed :

Induced E.M.F per phase	0	1880	4950	6600	7520	8180
Field amp. turns per pole	8	1100	3300	5500	7700	9900

Find the percentage regulation of the machine when delivering an output of 1400KVA at 0.8 power factor lagging.

Take distribution factor 0.96, and neglect armature leakage reactance and resistance drops.

8 — The open circuit test on a 1800 KVA 3 phase, 50 c/s, 6600 V, 8 pole, star connected synchronous generator gave the following open circuit characteristic at normal speed :

Induced E.M.F/phase	0	2175	3152	4000	4500	4900
Ampere turns/pole	0	1000	2000	3500	5000	7000

The armature has 72 slots and 5 coudnctors per slot· The field winding has 180 turns per pole. Resistance and leakage reactace drops are neglected. (a) Find the field current and percentage regulation at full load 0.8 p.f. lagging, (b) Sketch the winding arragement for 4 poles.

9 — A 2000 KVA, star connected, 50 c/s, 6600 V alternator with 48 poles has 228 turns in series per phase. The winding factor is 0.96. The saturation curve at rated speed is as follows ;

Induced E.M.F,/phase	0	6000	6600	7200	7800
Ampere turns/pole	0	4750	5720	6800	8500

Find the regulation for full load at 0.8 power factor lagging.

10 — A 1250 KVA, 3 phase, star connected, 50 c/s synchronous generator runs at 300 r.p.m. and has a termiral valtage of 3300 V at full load. The stator has a total number of slots of 180, each containing 5 conductors and the no load saturation curve is as follows :

Induced E.M.F, volts/phase	1500	1900	2100	2300
Field current, amps	56	81	106	158

The field winding has 60 turns per pole and the armature has a leakage reactance per phase of 1.2 ohms and negligible rasistance.

Find the regulation for full load at 0.8 power factor lagging.

11 — Describe one method for synchronising a synchronous machine on an infinite busbar system.

A 1500 KVA, 6600 V, 3 phase synchronous generator has the following open circuit and short circuit characteristics :

Line voltage	0	1815	3620	4940	5940	6600	7400	7920
Short circuit current	0	57.8	115,6	173,3	—	—	—	—
Field amp. turns/pole	0	1100	2200	3300	4400	5500	7150	8800

Find the regulation at full load 0.8 power factor lagging.

12 — A 5000 K.V.A., 6600 V, 50 c/s, 3 phase, star connected alternator runs at 250 r.p.m. and has the following saturation curve :

Exciting current (amps)	0	100	150	200	250	400
Induced E.M.F.(line value)	0	4800	6550	7500	8000	8700

The armature has 360 slots with two conductors per slot. The effective armature resistance and leakage reactance are 0.042 ohm and 1.01 ohms respectively. If the field winding has 68 turns per pole, find the regulation

for full load 0.8 power factor lagging.

13 — a — A salient pole machine is more stable than a machine with a cylindrical rotor. Discuss this statement in detail.

a 3 — phase delta connected synchronous gererator rated at 1875 KVA, 480 volts, 60 c/s,3600 r.p m. has an open — circuit characteristic determined by the following data :

Field Amp	20	40	60	80	100	120	140
Line voltage	222	435	553	600	625	642	656

The stator winding, consisting of single turn coils, is disposed in 15 slots/pole. There is one coil side in every slot and the coil span is 2/3 of the pole pitch. The stator resistance measured between two terminals is 0.00145 ohm, and leakage reactance is 0.098 ohm/phase. The field winding has 214 turns/pole. Find the regulation for full load current at 0.707 p.f. lagging. Why are the coils chorded by one third of a pole pitch ?

14 — Describe the connections usually employed in a generating station for the purpose of synchronising any of the generators with the infinite bus bars.

The open circuit test on a 3 phase, 50 c/s, 6600 V, 8 pole, star connected synchronous generator gave the following open circuit characteristic at normal speed :

Induced E.M.F/phase	0	2175	3152	4000	4500	4900
Ampere turns/pole	0	1000	2000	3500	5000	7000

The armature has 96 slots and 4 conductors per slot. The

field winding has 180 turns per pole and the leakage reactance drop is 10 %. If the machine is delivering an output of 1650 KVA at 0.8 power factor lagging, find the field current and the percentage regulation.

15 — The field from of a 3 phase, 50 c/s alternator measured from the neutral plane to the middle of the pole is as follows :

distance in cms.	0	1	2	3	4	5	6	7	10
induction in air gap (lines/sq. cm.)	0	350	2000	4200	7100	9000	9000	9000	9000

The curve is symmetrical about the centre. The alternator has 8 poles and 72 slots, with 10 conductors in each slot. The active length of the conductor is 40 cms.
(a) Find the phase and line E.M-Fs. of the star connected alternator. (b) Sketc the winding arrangement of the armature, being single layer with two plane end turns.

16 — Draw diagrams giving the armature M. M. F. distribution of a 3 phase machine at two different instants and prove that the fundamental component rotates in space at the same speed of the poles.

A 3 phase, 6600 V, star connected synchronous generator, with 9 slots per pole and 6 condutors per slot, gave the following open circuit characteristic at normal speed :

Field current (amps)	14	18	23	30	43
Torminal volts	4000	5000	6000	7000	8000

The field winding has 150 turns per pole and the leakage

reactance of the armature is 8 % . Determine the field current when the machine is delivering an output of 2000 KVA at 0.8 power factor lagging.

17 — A 1000 KVA, 6600 V, 3 phase, star connected synchronous generator has the following open and short circuit characteristics :

Field amp. turns	0	1100	3300	5500	7700	9900
Induced E.M.F./phase	0	1880	4950	6600	7520	8180
Short circut current	0	75	225	375	525	

If the reactance drop is 8 % and the resistance drop is 2 % of the normal voltage, find the regulation of the machine when running on full load 0.8 power factor lagging.

18 — Detetmine the voltage regulation of a 2000 volts, 1 — phase alternator giving a current of 100 A at

(a) unity power factor (b) power factor leading 0.71

(c) power factor 0.71 lagging.

From the test results ; Full load current, 100 A is produced on shortcircuit by a field excitation of 2.5 A, an E.M.F. of 500 V is procuded on open—circuit by the same excitation. The armature resistance is 0.8 ohm.

19 — A 5000 K.V.A., 6600 V, 3 — phase, star connected alternator has a resistance of 0.075 ohm per phase. Estimate by the Z.P.F. method the regulation for a load of 500 A at power factors (a) unity, (b) 0.9 leading, (c) 0.71 lagging, from the following open — circuit and full load. Z.P.F. curves ;

Field current A,	Open circuit terminal voltage V	Saturation curve Z.P.F., V
32	3100	0
50	4900	1850
75	6600	4250
100	7500	5800
140	8300	7000

20 — The table gives data for open—circuit, short—circuit and full—load Z.P.F. measurments on a 6 pole, 440 volts, 50 cycles, 3— phase, star connected alternator.

The effective ohmic resistance per phase is 0.15 ohm.

Field Current A	2	4	6	7	8	10	12	14	16	18
O.C. ter. Volts	156	288	396	440	471	530	568	592	610	625
S.C. Current A	11,4	22.8	34.2	40	45.6	57	68.4	80	—	—
Z.P.F. ter Volts				0	80	206	314	398	460	504

Determine the percentage regulation for full-load output of 40 A at rated voltage and 0.8 power factor lagging, by synchonous Impedance and ampereturns methods and from Z.P.F. curve, by Potier triangle method. Determine also the leakage reactance of the machine and field current to overcome armature reaction.

21 — A 1000 K.V.A. 11000 V, 3-phase, star—connected alternator has an effective reoistance of 2Ω per phase. The characteristics on open circuit and with full load current at zero power factor, and the open circuit

core losses are ;

Field current A	o c.c. ter V	core loss KW	zero p. f. V
40	–	—	—
50	7000	7.5	—
110	12500	16.6	8500
140	13750	22.4	10500
180	15000	33.5	12400

Deduce by the zero — power — factor method (a) the percentage regulation for full load at a lagging power factor of 0.8. Find also (b) the efficiency at this load, given that the field circuit has a resistance of 0.5 ohm and that the mechanical losses amount to 10 KW

الباب الرابع

خواص تشغيل الآلات المتزامنة

(Operation Characteristics of synchronous machines)

أولا - الآلة المتزامنة على حمل منفصل

(Synchronous Machine on isolated load)

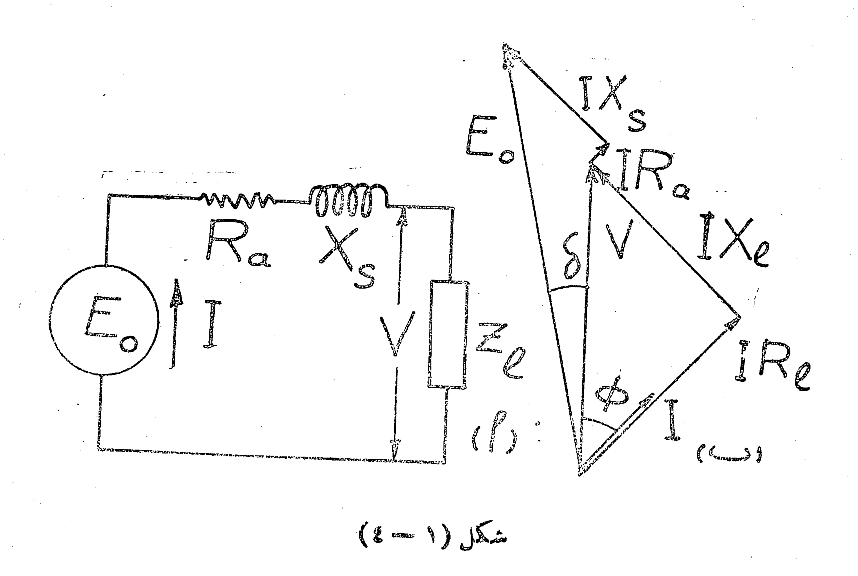
تشغيل الآلة المتزامنة بممانعة تزامن ثابتة :

(operation of synchrouous machine with constant synchronous reactance) :

سبق تعريف ممانعة التزامن . وهى ليست ثابتة القيمة ، إلا فى الجزء الخطى من منحنى الدائرة المفتوحة ، كما يظهر فى شكل (١٦ — ٣) . وهذا يعنى أننا نستطيع أن نفترض أن ممانعة التزامن ثابتة القيمة ، إذا أهملنا ظاهرة التشبع فى الدائرة المغناطيسية للآلة . وهو اجراء نلجأ اليه ، فى كثير من الأحوال ، حتى يمكننا تحليل بعض الظواهر الخاصة بالآلات الكهربية ، وذلك عندما يقف منحنى الدائرة المفتوحة ، الذى لا نستطيع التعبير عنه بمعادلة رياضية ، حائلا دون الحصول على تحليلات رياضية متسلسلة . وفى هذه الحالة يكون التحليل نوعيا ، وليس كميا ، بمعنى أننا نستطيع أن نستخلص من النتائج بعض القواعد العامة ، ولكننا لا نستطيع أن نجزم بصحة هذه النتائج من الناحية الحسابية البحتة . وقد نلجأ أحيانا إلى عمل بعض القياسات ، وتعديل النتائج التى حصلنا عليها ، على

هذى مايتمخض عن هذه القياسات ، بحيث نستطيع الاطمئنان فى النهاية إلى أن النتائج قد استقامت مع الحسابات الصحيحة .

إن اعتبار الآلة المتزامنة ذات معاوقة تزامن ثابتة القيمة ، يمكننا فى الواقع من دراسة خواص تشغيلها باستخدام دائرة كهربية بسيطة ، مكونة من القوة الدافعة الكهربية E_o ، موصلة مع معاوقة التزامن ومعاوقة الحمل على التوالى ، كما هو مبين فى شكل (١ — ٤ أ) . نفترض أولا أن تيار التنبيه قد ثبت عند قيمة معينة فى هذه الحالة ، مما يعنى ثبوت قيمة E_o ، ونبحث فى تأثير تغيير الحمل ، ومعامل قدرة الحمل ، على الملامح المختلفة لخواص تشغيل الآلة ، وأهمها بالنسبة للمولد الضغط الطرفى ومعامل التنظيم .



شكل (١ — ٤)

فاذا فرضنا أن المولد يدور بسرعة التزامن الثابتة ، وأن تيار التنبيه قد ثبت عند قيمة معينة ، بحيث نحصل على قوة دافعة كهربية ثابتة معينة قيمتها E_o ، فان الضغط الطرفى V ، الذى يعادل هبوط الضغط IZ_l فى معاوقة الحمل Z_l ، يتوقف على قيمة

تيار الحمل I ، وزاويته المرحلية φ مع هذا الضغط ، وكلاهما يتوقف بدوره على قيمة المعاوقة Z_l ، وطبيعتها ، كما هو مبين فى مخطط المتجهات فى شكل (١ — ٤ ب).
ويمكننا ، فى هذه الحالة ، باعتبار معاوقة التزامن Z_s ثابتة ، ربط الحدود المختلفة فى الدائرة بالعلاقات الاتجاهية الآتية ، وذلك بالرجوع إلى مخطط المتجهات ، وعلى أساس أن كل حد يمثل كمية موجهة (Vector)[1] .

$$\dot{E}_o = \dot{V} + \dot{I}\,\dot{Z}_s \quad , \quad \dot{V} = \dot{E}_o - \dot{I}\,\dot{Z}_s = \dot{I}\,(R_l + jX_l)^*$$

$$\dot{V} = \dot{I}\,\dot{Z}_l \quad , \quad \dot{E}_o = \dot{I}\,(\dot{Z}_l + \dot{Z}_s) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٤ — ١)$$

$$E_o = \sqrt{(V\cos\phi + IR_a)^2 + (V\sin\phi + IX_s)^2}$$

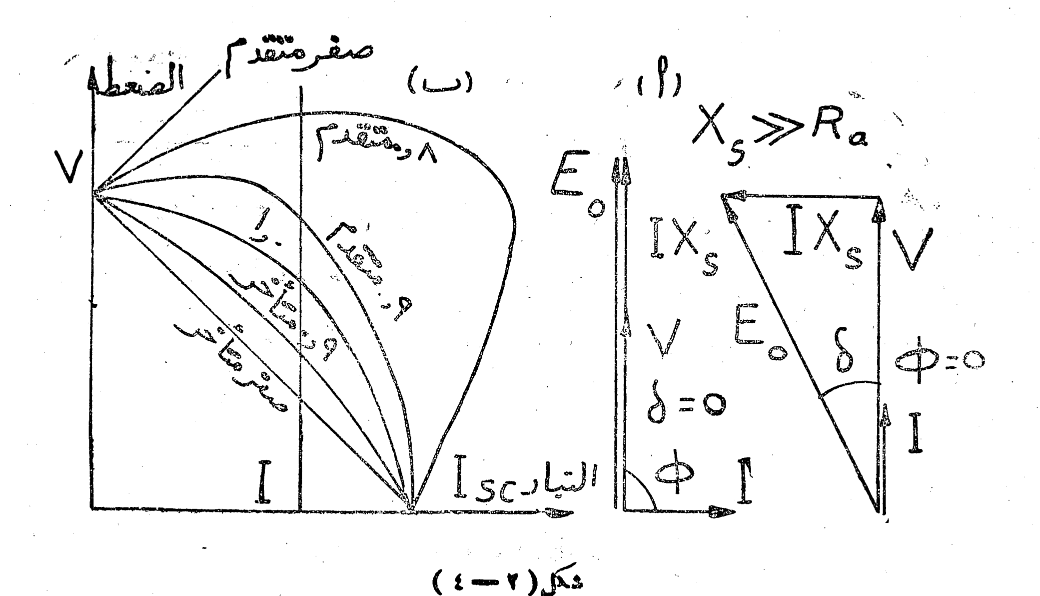
$$E^2_o = (IR_l + IR_a)^2 + (IX_l + IX_s)^2 \quad \ldots\ldots \quad (٤ — ٢)$$

نستطيع تتبع الطريقة التى يتغير بها الضغط الطرفى V ، باعتبار حمل ذى معامل قدرة معين وثابت $\left(\phi = \tan^{-1}\frac{X_l}{R_l}\right)$ ، وتغيير قيمة I فى المعادلة (٢ — ٤) ، فنحصل على مجموعة المنحنيات المبينة فى شكل (٢ — ٤ ب). ويمكن الحصول على كل من المنحنى الخاص بمعامل قدرة صفر ، والمنحنى الخاص بمعامل قدرة الواحد الصحيح، بتبسيط المعادلة (٢ — ٤) ، وذلك باهمال المركبة الخاصة بهبوط الضغط فى مقاومة ملفات المنتج IR_a ، فنحصل تبعا لشكل (٢ — ٤ أ) على المعادلتين المبسطتين :

---

(١) سوف اضع نقطة فوق الحرف عند اعتباره كمية موجهة .

* تكون X_l سالبة أو موجبة $\left(X_l = \omega L = -\frac{1}{\omega C}\right)$ على حسب ما اذا كانت ممانعة سعوية أو حثية .



شكل (٢ — ٤)

معادلة خط مستقيم $\longrightarrow$ $V \cong E_o - IX_s$ معامل قدرة صفر

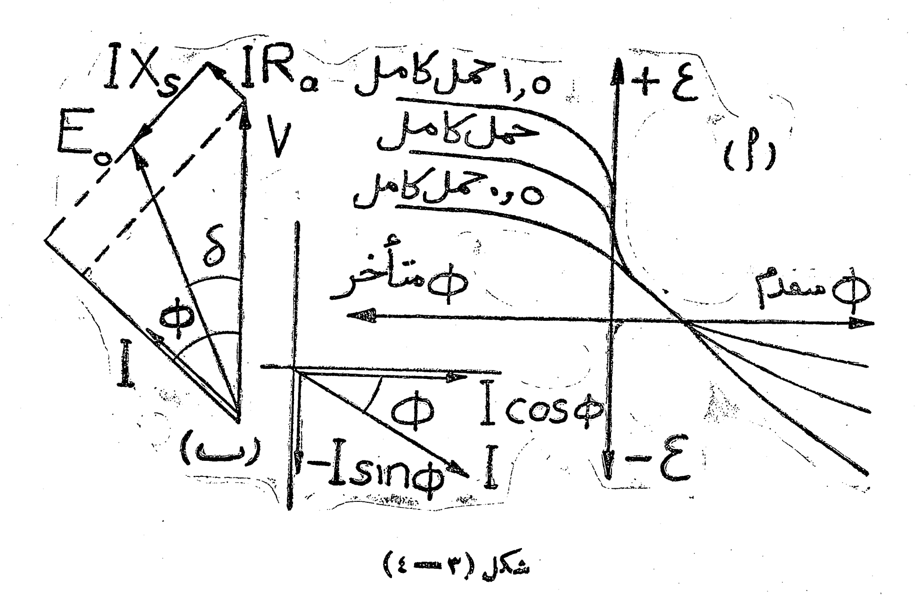
معادلة قطع ناقص $\longrightarrow$ $V^2 + (IX_s)^2 \cong E^2_o = \text{constant}$ معامل قدرة واحد

ونحصل فى جميع الحالات على نفس تيار القصر I_{sc} ، وذلك بوضع V يساوى صفراً (أو Z_1 أيضا يساوى صفراً) فى المعادلتين (١ — ٤) ، (٢ — ٤) ، حيث :

$$\dot{I}_{cs} = \frac{\dot{E}_o}{\dot{Z}_s} \quad , \quad I_{cs} = \frac{E_o}{\dot{Z}_s}$$

وتبلغ قيمة تيار القصر I_{sc} حوالى 150% من تيار الحمل الكامل، فى الآلات الحديثة ، وقد تقل عن ذلك أيضا بالنسبة للآلات التوربينية الكبيرة ، حيث يراعى عدم تأثرها ببعض الأخطاء (faults) التى تحدث فى مجموعات القدرة الكبيرة (Big power systems) .

وتتغير قيمة معامل التنظيم ε بتغير قيمة الضغط الطرفى V ، بطبيعة الحال ، ويمكننا حسابها بالتعويض من المعادلة (٢ — ٤) فى معادلة معامل التنظيم $\varepsilon = \frac{E_o - V}{V}$. ونحصل على المنحنيات التى تربط بين قيمة معامل التنظيم وتيار الحمل ، عند القيم المختلفة لمعامل القدرة ، بطريقة مشابهة لتلك التى اتبعناها فى حالة منحنيات الضغط ، وذلك من حيث تثبيت تيار الحمل عند قيمة معينة ، وتغيير معامل القدرة للحصول على منحنى بعينه ، ويبين شكل (٣ — ٤ أ) هذه المنحنيات .



شكل (٣ — ٤)

ملحوظة هامة : يجب ملاحظة أن كلا من IR_a و IX_s الواردة فى مخطط المتجهات ، بالإتجاه المعطى ، ليست هى هبوط الضغط فى مقاومة ملفات المنتج ، ومانعتها لكل مرحلة ، على الترتيب ، وإنما هى مركبة الضغط E_o اللازمة لمعادلة هذا الهبوط ، كما سبقت الاشارة اليه من قبل . لذلك يجب ، عند التعويض عن

قيمة ϕ فى المعادلة (٣ — ٤) ، أن تكون موجبة ، فى حالة معامل القدرة المتأخر ، وسالبة فى حالة معامل القدرة المتقدم . وهذا هو عكس ما نفعل للحصول على المتجه $\dot{I}$ ، للتعويض فى المعادلة (١ — ٤) ، حيث يكون $\dot{I} = I \cos \phi - jI \sin \phi$ فى حالة معامل القدرة المتأخر ، ويكون $\dot{I} = I \cos \phi + jI \sin \phi$ فى حالة معامل القدرة المتقدم . شكل (٣ — ٤ ب) يوضح كل ذلك .

بدراسة كل من شكلى (٢ — ٤ب) و (٣ — ٤ أ) نحصل على النتائج النوعية الآتية : عند تشغيل المولد المتزامن بتيار تنبيه ثابت يقل الضغط الطرفى V ، وتزداد بالتالى قيمة معامل التنظيم ، كلما زادت قيمة تيار الحمل ، وذلك عندما يكون معامل القدرة متأخرا ، بحيث يزداد معدل الانخفاض فى قيمة الضغط الطرفى ، والازدياد فى قيمة معامل التنظيم كلما قلت قيمة معامل القدرة المتأخر . ويكون معامل التنظيم ذا قيمة موجبة فى هذه الحالة .

عندما يصبح معامل القدرة متقدما تزداد قيمة الضغط الطرفى (بالنسبة للاحمال التى تقل كثيرا أو قليلا عن الحمل الكامل) ويصبح معامل التنظيم ذا قيمة سالبة ، ويزداد معدل الارتفاع فى قيمة الضغط الطرفى ، وكذلك معدل الازدياد فى قيمة معامل التنظيم السالبة ، كلما قلت قيمة معامل القدرة المتقدم . هذا ونستطيع أن نحصل على ضغط طرفى ثابتة القيمة تقريبا ، ومعامل تنظيم يساوى الصفر ، عند معامل قدرة متقدم قريب من الواحد الصحيح ، وذلك عند الحمل الكامل ، والأحمال التي تقل عن ذلك .

حساب الضغط الطرفى ومعامل التنظيم عند حمل معين :

إذا كان معلوما لدينا قيمة التيار I ، وزاوية اختلافه المرحلى ϕ مع الضغط الطرفى V ، يمكننا حساب قيمة V من المعادلة (٢ — ٤) ، وذلك بعد الحصول على قيمة E_o من منحنى الدائرة المفتوحة للآلة ، بمعرفة قيمة تيــــار التنبيه I_f (أو الأمبير لفات على كل قطب $N_f \; I_f$) ، الذى نفترض أنه يظل ثابتا . وفى هــذه الحــالة لابد أن تكون لدينــا قيمــة معلومة لكل من R_a و X_s (يمكن اهمال R_a واعتبار أن $X_s = Z_s$ فى أحيان كثيرة) . ويمكن حل المسألة بالرسم بالطريقة المبينة فى شكل (١٣ — ٣ب) ، التى سبق توضيحها .

وفى بعض الأحيان يكون معلوما لدينا قيمة القدرة الفعالة للحمل P ، بالوات لكل مرحلة ، بدلا من قيمة التيار ، ومعامل قدرة الحمل $\cos \phi$ ، ويتعين علينا تحديد قيمة الضغط الطرفى V ، مع وجود بقية المعلومات السابقة . ويكون الحل فى هذه الحالة على النحو التالى :

$$P = VI \cos \phi \quad , \quad I = \frac{P}{V \cos \phi} \quad \cdots\cdots \quad (٣ — ٤)$$

$$\therefore \quad IR_a \times V \cos \phi = PR_a \quad \cdots\cdots \quad (٤ — ٤)$$

$$Q = VI \sin \phi \quad , \quad Q = P \tan \phi \;\; VAR$$

$$\therefore \quad IX_s \times V \sin \phi = QX_s \quad \cdots\cdots\cdots \quad (٥ — ٤)$$

بفك حدى الطرف الأيمن للمعادلة (٢ — ٤) نجد أن :

$$E_o^2 = V^2 + 2\, IR_a \times V \cos \phi + 2\, IX_s \times V \sin \phi$$
$$+ I^2 (R^2_a + X^2_s) \quad \cdots\cdots\cdots \quad (٦ — ٤)$$

بالتعويض من المعــــادلات (٣ — ٤) ، (٤ — ٤) ، (٥ — ٤) فى المعــادلة

(٤ — ٦) ، وضرب المعادلة الجديدة فى V^2 ، نجد أن :

$$V^4 - [E^2_\circ - 2(PR_a + QX_s)]V^2$$

$$+ (R^2_a + X^2_s)\left(\frac{P}{\cos\phi}\right)^2 = 0 \quad \ldots\ldots \quad (٤ - ٧)$$

وهذه معادلة من الدرجة الثانية فى V^2 على النمط :

$$a(V^2)^2 + bV^2 + C = 0$$

$$a = 1$$

$$b = -[E_\circ^2 - 2(PR_a + QX_s)]$$

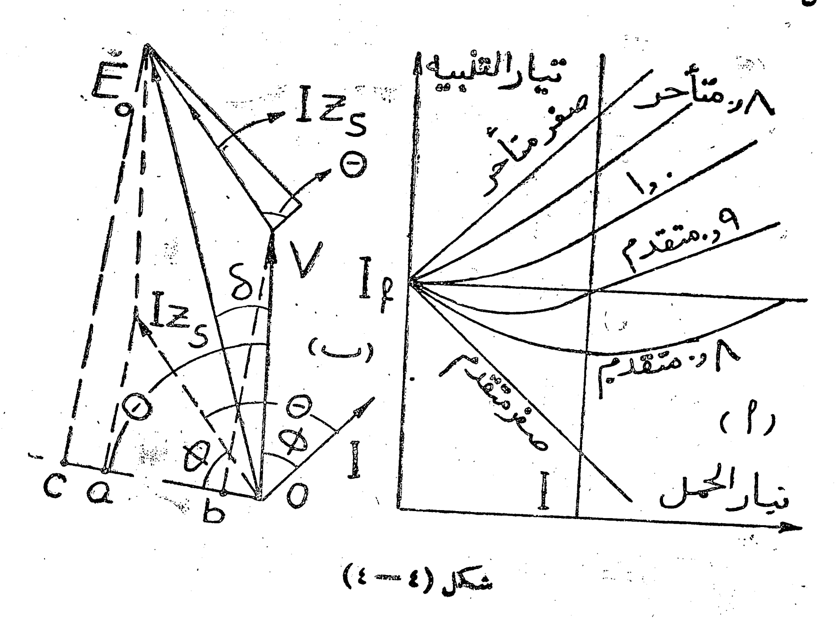
$$C = (R_a^2 + X_s^2)\left(\frac{P}{\cos\phi}\right)^2 = Z_s^2\left(\frac{P}{\cos\phi}\right)^2$$

$$V = \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4C}}{2}} = \sqrt{\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4C}}{2}} \quad (٤ - ٨)$$

وقد اخترنا القيمة ذات الاشارة الموجبة فقط لأنها تعطى الضغط الأكبر ، وبالتالى مفقودات نحاسية أقل فى ملفات المنتج ،

إذا أردنا الحصول على ضغط طرفى V ثابت القيمة ، يجب تغيير تيارالتنبيه ، لتغيير قيمه $E_\circ$ ، وذلك تبعا لتغير قيمة تيار الحمل I ، ومعامل القدرة $\cos\phi$. ويتضح من شكلى (١ — ٤) ، (٢ — ٤) أنه عند معامل قدرة الوحدة ، وأى معامل قدرة متأخر يجب زيادة قيمة تيار التنبيه للحصول على ضغط طرفى ثابت القيمة ، بينما نحتاج إلى تقليل قيمة تيار التنبيه ، لنفس السبب ، عند معاملات القدرة المتقدمة ذات القيمة المنخفضة ، وذلك لأن التيار السعوى المار فى ملفات المنتج يقوى المجال المغناطيسى للأقطاب الرئيسية ولايضعفه . يبين شكل (٤ — ٤) ، المنحنيات التى تربط بين تيار التنبيه وتيار الحمل ، عند قيم مختلفة

لمامل القدرة ، وذلك للحصول على ضغط طرفى ثابت القيمة .



شكل (٤ — ٤)

مثال محلول :

a 3-phase, 50 c/s, 3300 V synchronous generator is rated at 520 KVA. It has a leakage reactance and armature resistance drops of 8 % and 2 % respectively. With the full load rated current circulated in the machine on short circuit, when driven at normal speed, there was an excitation of 2800 ampere — turns on each pole of the rotor. The machine gave the following no laod magnetisation curve at normal speed

phase e.m.f.	:	0	920	1620	2050	2300
AT/pole	:	0	2000	4000	6000	10000

i) Draw the saturation cnrve at full load zero power factor, and hence determine the percentage regulation at full load 0.8 p·f, leading.

ii) Find the terminal voltage when the generator is delivering 340 KW at 0.8 p.f. lagging, and with the excitation adjusted to 7000 ampere turns per pole.

(i) $I = \dfrac{520 \times 1000}{\sqrt{2} \times 3300} = 90.85$ A , $V = \dfrac{3300}{\sqrt{3}} = 1905$ V

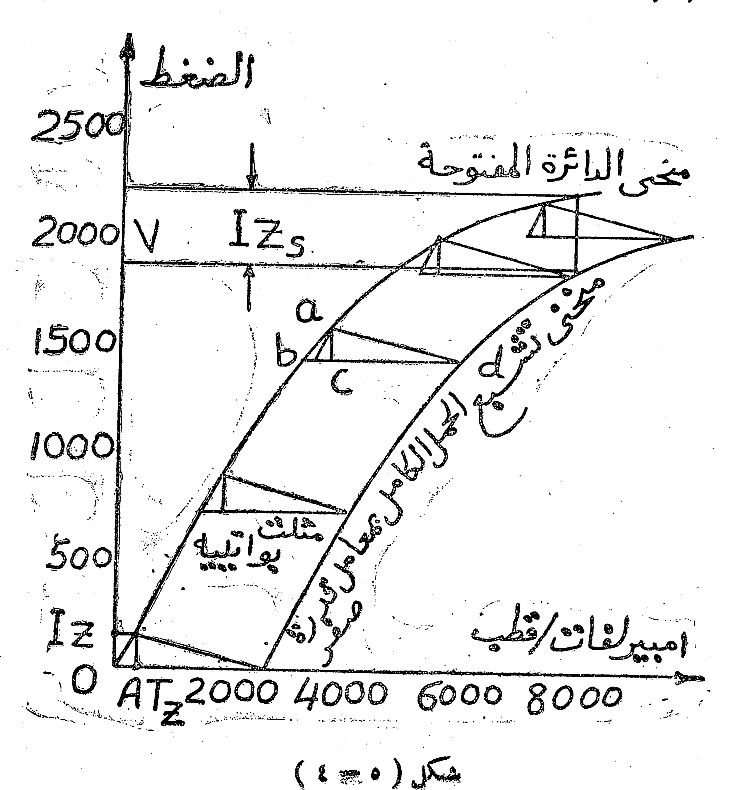
$IX_l = 1906 \times 0.08 = 152.4$ V , $IR_a = 38.1$ V ,

$R_a = 0.42$ ohm

$IZ = \sqrt{(152.4)^2 + (38.1)^2} = 157.4$ V ,

$AT_z = 357$

$AT_A = AT_{fl} - AT_z = 2800 - 350 = 2450$ أمبير لفة/قطب



شكل (٥ — ٤)

يبين شكل (٥ــ٤) كيفية رسم منحنى التشبع عند الحمل الكامل بمعامل قدرة صفر ، باستخدام مثلث بواتييه . لتعيين نقطة مثل d على هذا المنحنى نختار أية نقطة على منحنى الدائرة المفتوحـــة ، ولتكن a . نرسم من a المستقيم ab يوازى الجزء الأول من منحنى الدائرة المفتوحة عند O (الجزء المستقيم من هذا المنحنى)، كما نسقط من a أيضا العمود aC طوله يساوى IX_s ($=152.4V$) ومن C نرسم المستقيم bcd أفقيا ، ثم نحدد عليه النقطة d (التى تقع على المنحنى المطلوب) ، بحيث يكون bd مساويا AT_{fl} ($= 2800$) .

لحساب معامل التنظيم نبدأ أولا بتعيين معاوقة التزامن عند الحمل الكامل بمعامل قدرة صفر ، وذلك بتحديد IZ_s كما هو مبين فى شكل (٥ــ٤) .

$$IZ_s = 2240 - 1905 = 335 \text{ V}$$

$$Z_s = \frac{335}{90.85} = 3.69 \quad ,$$

$$X_s = \sqrt{(3.69)^2 - (0.42)^2} = 3.66 \text{ ohms}$$

$$E_o = \sqrt{(V\cos\phi + IR_a)^2 + (V\sin\phi + IX_s)^2}$$

$$= \sqrt{(1524 + 38.1)^2 + (1143 + 328)^2}$$

$$= 2145 \text{ V}$$

$$\varepsilon = \frac{2145 - 1905}{1905} = 0.126 = 12.6 \%$$

بالرجوع إلى منحنى الدائرة المفتوحة نجد أنه عند ضبط التنبيه على 7000 أمبير لفة على كل قطب تصبح قيمة E_o تساوى 2150 V ، وللحصول على الضغط المرحلى على أطراف المولد نطبق المعادلة (٨ــ٤) على النحو التالى :

$$P = \frac{340000}{3} = 113250 \text{ W} ,$$

$$Q = P \tan \phi = 85000 \text{ VAR}$$

$$R_a = 0.42 \text{ ohm} \quad , \quad X_s = 3.66 \text{ ohms}$$

$$b = -[4.6 \times 10^6 - 2(0.113250 \times 0.42 \times 10^6 + 0.085$$
$$\times 3.66 \times 10^6)]$$

$$= -[4.6 \times 10^6 - 0.7172 \times 10^6] = -3.8828 \times 10^6$$

$$c = (3.69)^2 \left[\frac{0.11325 \times 10^6}{0.8} \right]^2$$

$$= 13.6 \times 0.02 \times 10^{12} = 0.27 \times 10^{12}$$

$$b^2 = 15 \times 10^{12} \quad , \quad b^2 - 4c = 13.92 \times 10^{12}$$

$$V_t = \sqrt{\frac{3.883 \times 10^6 + \sqrt{13.92 \times 10^{12}}}{2}} = 1950 \quad \text{V}$$

V_L (terminal voltage) $= 1950 \times \sqrt{3} = 3380$ V الضغط الخطى

علاقات القدرة (Power relations) :

عندما يكون الضغط الطرفى V فولت (الضغط على طرفى الآلة لكل مرحلة ، وهو نفس الضغط المرحلى للحمل) ، وتيار الحمل I أمبير ، وزاوية الاختلاف المرحلى بينهما ϕ ، فان قدرة الخرج (output power) ، التى تعطيهـا الآلة لكل مرحلة فى الحمل ، والتى نرمز لها بالرمز P_o ، تصبح $P_o = VI \cos \phi$ وات .

فاذا كانت E_o هى القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى كل مرحلة من ملفات المنتج ، بفعل الأمبير لفات AT_p على كل قطب ، نجد كما هو مبين فى شكل (٤ — ٤ ب) أن الزاوية بين E_o , I هى ($\delta + \phi$) (سبق أن رمزنا لهذه الزاوية بالرمز ψ

فى مخطط المتجهات الخاص بالامبير لفات) ، وتكون قدرة المدخل الكهربية (Electrical power input) لكل مرحلة هى $P_e = E_o I \cos(\phi + \delta)$
ويطلق على هذه أيضا اسم قدرة المنتج المرحلية (armature phase power)
وهى عبارة عن القدرة (لكل مرحلة) التى يحولها المنتج الى قدرة كهربية ،
ويأخذها المنتج من عمود الادارة على شكل قدرة ميكانيكية . فاذا أضفنا إلى هذه
القدرة المفقودات الميكانيكية (mechanical losses) ، ومفقودات الحديد
(iron or core losses)فى الآلة ، فاننا نحصل على قدرة المدخل P_i ، التى تأخذها
الآلة الكهربية من الآلة الميكانيكية ، على شكل قدرة ميكانيكية ، لتحويلها إلى
قدرة كهربية P_o فى الحمل الكهربى . وبذلك يكون معامل الجودة للآلة الكهربية
$\eta = \frac{P_o}{P}$.

بتحليل E_o و V فى إتجاه I نجد ، بالرجوع إلى شكل (٤ — ٤ب) أن :

$$P_e = E_o I \cos(\phi + \delta) = I(V\cos\phi + IR_a)$$
$$= VI\cos\phi + I^2R_a \qquad \text{(٩ — ٤)}$$

وهذا يعنى أن جزءا من القدرة الكهربية P_e ، وهو المعطى بالحد I^2R_a فى
المعادلة (٩ — ٤)، يتبدد على شكل مفقودات نحاسية (قدرة كهربية) فى ملفات
المنتج ، وتبقى قدرة المخرج $VI\cos\phi$ التى تعطى للحمل الكهربى . هذا وتتحدد
قيمة E_o فى المعادلة (٩ — ٤) على حسب تيار الحمل I ، ومعاوقة التزامن Z_s ، كما
سبق بيانه فى الباب الثالث . ويمكن إيجاد كل من P_o و P_e بدلالة Z_s ، بالرجوع
إلى شكل (٤ — ٤ب) ، على النحو التالى :

بعد رسم مخطط المتجهات من I , V و E_o باستخدام Z_s ، كما سبق شرحه فى

الباب الثالث ، نرسم IZ_s من نقطة الأصل O ، ثم نرسم الخط Obac يصنع الزاوية θ مع V . نسقط من أطراف V و IZ_s و E_o أعمدة على هذا الخط تقابله فى b و a و c على الترتيب ، كما هو مبين فى شكل (٤ — ٩ ب) ، الذى تتضح بمراجعته الحقائق الآتية :

١ — الزاوية بين I و IZ_s هى θ (حيث $\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_a}$) ،

وبذلك يكون الخط Obac متقدما على IZ_s بالزاوية φ .

٢ — يكون مسقط IZ_s على Oc هو Oa ، حيث $Oa = IZ_s \cos \phi$ ،

ولكن $Oa = Oc - ac$ ، كما أن $Ob = ac$ (كل منهما مسقط V على Oc)

وبناء على هذا كله نجد أن :

$$Oa = Oc - Ob = E_o \cos(\theta - \delta) - V \cos \theta = IZ_s \cos \phi$$

بالضرب فى $\frac{V}{Z_s}$ ينتج أن :

$$P_{o1} = VI \cos \phi = \frac{V}{Z_s} [E_o \cos(\theta - \delta) - V \cos \theta] \quad (٤ — ١٠)$$

ويمكن بطريقة مماثلة اثبات أن :

$$P_{e1} = E_o I \cos(\phi + \delta) = \frac{E_o}{Z_s} [E_o \cos \theta - V \cos(\theta + \delta)] \quad (٤ — ١٠)$$

ويمكن تعديل هاتين المعادلتين بحيث تطبقان على المحرك المتزامن ، على النحو التالى :

$$P_{e1} = \left(\frac{E_o}{Z_s} \right) [V \cos(\theta - \delta) - E_o \cos \theta]$$

$$P_{o1} = \left(\frac{V}{Z_s} \right) \left[V \cos\theta - E_o \cos(\theta + \delta) \right] \quad (٤—١١)$$

وباعتبار أن $\theta = \frac{\pi}{2}$ تقريبا يمكن تقريب هذه المعادلات إلى :

$$P_{o1} \cong \frac{VE_o}{Z_s} \sin\delta \cong V I \cos\phi$$

$$P_{e1} = \frac{E_o V}{Z_s} \sin\delta \cong E_o I \cos\psi \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٤—'١١)$$

هذا ونظرا لأن الزاوية θ تكون قريبة جدا من $\frac{\pi}{2}$ لأن X_s أكبر كثيرا من R_a ، فانه يمكن تبسيط المعادلتين (١٠—٤) ، باعتبار $\theta = \frac{\pi}{2}$ ، على النحو التالى :

$$\left. \begin{aligned} P_{e1} &\cong \frac{E_o}{Z_s} V \sin\delta = E_o I \cos(\phi + \delta) \\ P_{o1} &\cong \frac{V}{Z_s} E_o \sin\delta = V I \cos\phi \end{aligned} \right\} \quad (٤—١٢)$$

نجد أن $P_{e1} \cong P_{o1}$ فى هذه الحالة ، وهذه نتيجة حتمية لإعتبار أن $\theta = \frac{\pi}{2}$ ، لأن هذا يعنى ضمنا أن $R_a = 0$ ، مما يؤدى إلى اختفاء حد المفقودات الحرارة التى تتبدد فى ملفات المنتج بالقيمة $I^2 R_a$ ، وهى الفرق بين المعادلتين (١٠—٤) ، (١١—٤). ويتبين لنا من المعادلة (١٢ — ٤) أن كلا من قدرة المدخل الكهربية P_{e1} ، وقدرة المخرج P_{o1} ، للآلة المتزامنه ، يتناسب مع جيب الزاوية δ (أو مع الزاوية δ مقدرة بالزوايا نصف القطرية إذا كانت

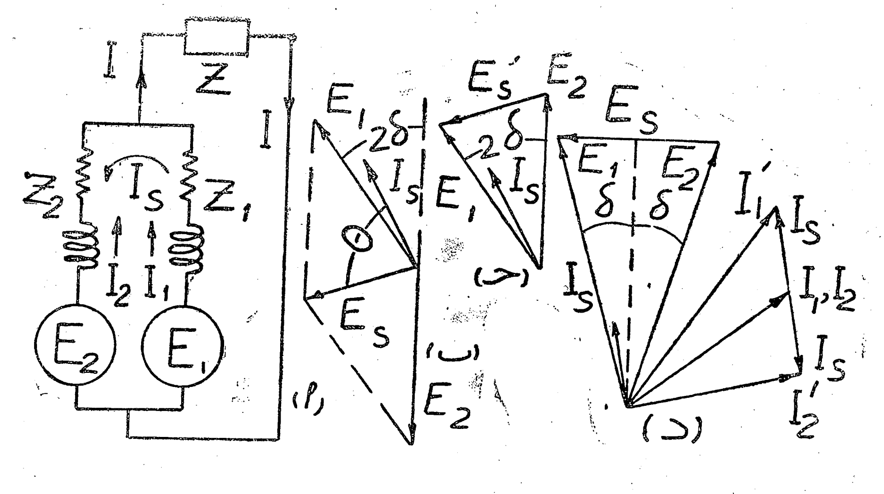
صغيرة) . وهذه الزاوية δ هى التى تحدد مقدار الازاحة التى تحدث لمحاور الفيض المغناطيسى ϕ_o ، التى تنطبق أصلا مع محاور الأقطاب الرئيسية ، وذلك بفعل الفيض المغناطيسى ϕ_A لملفات المنتج ، حتى تقع فى النهاية على محاور الفيض المغناطيسى المحصل ϕ_R . ويطلق على الزاوية δ عادة اسم زاوية الحمل (load angle) ، كما يطلق عليها أيضا اسم زاوية عزم الدوران (torque angle) .
ويتضح من المعادلة (١٢ — ٤) أن زيادة قيمة E_o ، وبالتالى قيمة تيار التنبيه ، يؤدى إلى زيادة قدرة المخرج لكل وحدة من الزاويه δ $\left(\frac{P_{o1}}{\delta} \right)$ ، وهذا يعزز من اتزان الآلة .

ثانيا — تشغيل مولدى تزامن على التوازى على حمل منفصل

(Paral el operation of two synchronous generators on isolated load)

يبين شكل (٦ — ٤ أ) مولدى تزامن متصلين على التوازى ، ويغذيان معا حملا منفصلا يتمثل فى المعاوقة Z ، حيث E_1 هى القوة الدافعة الكهربية المرحلية ، المتولدة فى ملفات المنتج بفعل الأمبير لفات AT_p الموجودة على كل قطب ، بالنسبة للآلة الاولى ، و E_2 بالنسبة للآله الثانية ، و Z_1 هى معاوقة التزامن للآلة الاولى و Z_2 للآلة الثانية ، و I'_1 هو التيار الذى تشارك به الآلة الأولى و I'_2 التيار الذى تشارك به الآلة الثانية ، فى تيار الحمل الكلى I .

إذا أمكن جعل الآلتين تولدان قوتين دافعتين كهربيتين متساويتين تماما فى القيمة ، ومتفقتين معا مرحليا ، كل منهما تساوى E_o ، فاننا نحصل على علاقة بسيطة لتقسيم التيار بينهما على النحو التالى :



شكل (٦ — ٤)

$$\dot{V} = \dot{I}\,\dot{Z} = \dot{E}_\circ - \dot{I}_1\,\dot{Z}_1 = \dot{E}_\circ - \dot{I}_2\,\dot{Z}_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٤ - ١٣)$$

$$\therefore \quad \dot{I}_1\,\dot{Z}_1 = \dot{I}_2\,\dot{Z}_2 \quad , \quad \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}\,\frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad , \quad \dot{I}_2 = \dot{I}\,\frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad (٤ - ١٤)$$

تبين المعادلة (١٤ — ٤) أن الآلتين تتقاسمان التيار الكلى I بينهما بنسبة عكسية لمعاوقتى التزامن فيهما، وذلك إذا استطعنا الاحتفاظ بالشرط السابق قائما طول الوقت، وهو تساوى $E_\circ$ عدديا ومرحليا طول الوقت. هذا وعلى الرغم من أننا لانستطيع أن ندعى القدرة على الاحتفاظ بهذا الشرط دون خلل طوال وقت تشغيل الآلتين على التوازى، إلا أننا نستطيع أن نبرهن على أن طبيعة تكوين كل من المولدين تساعد على القضاء آليا على الآثار التى تترتب على نشوء اختلاف فى القوة الدافعة الكهربية المرحلية فى المولدين. ونظراً لأن القدرة التى يساهم بها كل مولد تتوقف على زاوية الحمل δ ، فان أهم الآثار، التي تعنينا فى

هذا المضمار ، هى تلك التى تترتب على تقدم متجه القوة الدافعة الكهربية فى أحد المولدين على متجه القوة الدافعة الكهربية فى الاخرى ، نتيجة لزيادة فى سرعة الاولى ، أو ابطاء فى سرعة الثانية .

نفرض أولا أن الآلتين متماثلتان ، وتدوران بدون حمل ، وأن القوتين الدافعتين الكهربيتين E_1 ، E_2 متساويتان فى القيمة ، ومتفقتان معاً مرحلياً . هذا يعنى أنه بالنسبة للدائرة الخارجية ، التى يغذيها المولدان ، يكون المتجهان اللذان يمثلان القوتين منطبقين تمام الانطباق . أما بالنسبة للدائرة الداخلية ، المتكونة منهما معاً على التوالى ، فان هذين المتجهين يكونان متساويين فى المقدار ومتضادين فى الاتجاه ، بحيث لاينتج عنهما أى تيار فى الدائرة المذكورة . فاذا أسرعت الآلة الاولى قليلا ، فان هذا يؤدى إلى تقدم متجه القوة الدافعة الكهربية فيها ، وهو E_1 ، بالزاوية 2δ ، على متجه القوة الدافعة الكهربية فى الآلة الثانية ، وهو E_2 ، وذلك كما هو مبين فى شكل (٦ — ٤ب) ، بالنسبة للدائرة الداخلية بين المولدين ، وفى شكل (٦ — ٤ح) ، بالنسبة للدائرة الخارجية لهما معاً . وينتج عن ذلك وجود قوة دافعة كهربية محصلة E_s تعمل على تمرير التيار I_s فى الدائرة الداخلية بين المولدين ، كما هو مبين فى شكل (٦ — ٤ أ) . وتحتوى هذه الدائرة على معاوقتى التزامن Z_1 و Z_2 متصلتين على التوالى معاً . ولما كانت نسبة ممانعة التزامن X_s ، فى كل من المعاوقتين ، عالية جدا بالنسبة للمقاومة R_a فيهما ، فان الزاوية θ بين E_s و I_s تساوى 90 درجة كهربية تقريبا . وهذا يعنى ، كما يتضح من شكلى (٦ — ٤ب ، ح) ، أن التيار I_s يظهر فى الدائرة بالنسبة الآلة الاولى كمولد ، وبالنسبة للآلة الثانية كمحرك ، فيكون تأثيره بالإبطاء فى سرعة الآلة الاولى ، والزيادة فى سرعة الآلة الثانية ، مما يؤدى إلى إعادة توازن الامور

كما كانت عليه فى أول الأمر .

إذا أهملنا المفقودات النحاسية فى مقاومة الملفات على منتجى المولدين (بفرض أن $R_a = 0$ ، وهذا يتمشى مع فرضنا أن $\frac{\pi}{2} \simeq \theta$) واعتبرنا أن التيار I_s فى توافق مرحلى تقريبا مع كل من E_1 (كمولد) و E_2 (كمحرك) نجد أن القدرة التى يحمل بها المولد، وتتسبب فى إبطاء سرعته، ونرمز لها بالرمز P_s ، تساوى تقريبا القدرة التى يأخذها المحرك ، وتتسبب فى زيادة سرعته ، حيث :

$$P_s \simeq E_1 I_s \simeq E_2 I_s \quad \ldots\ldots\ldots \quad (١٥-٤)$$

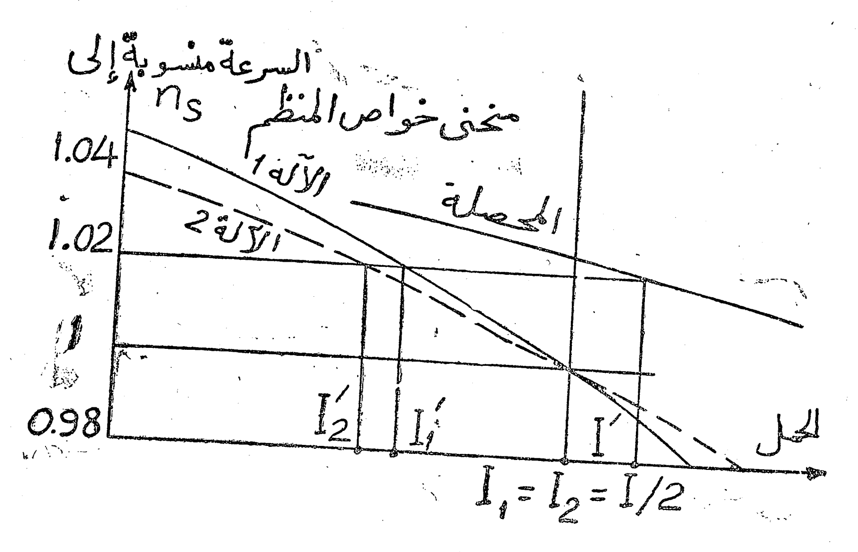
يطلق على P_s اسم قدرة التزامن (synchronising power) ، وهى تمثل القدرة التى تسرى بين منتجى المولدين لإعادتهما إلى حالة التوازن الأصلية ، من حيث دوران كل منهما بسرعة التزامن ، واتفاق متجهى القوة الدافعة الكهربية فيهما مرحليا بالنسبة للدائرة الخارجية . وتزداد قيمة هذه القدرة آلياً بازدياد درجة الخلل فى حالة التوازن الأصلية ، كما يستطيع كل مولد احتمال هذه القدرة فى حدود قيمة النهاية العظمى للقدرة التى يولدها . ويلاحظ أن السبب فى سريان قدرة التزامن بين المولدين ، على هذا النحو ، وبهذه الفاعلية ، يرجع فى الأساس إلى طبيعة تكوين الدائرة الداخلية لكل منهما ، من حيث زيادة قيمة الممانعة الحثية (X_s) ، فى هذه الدائرة ، على قيمة المقاومة (R_a) بدرجة كبيرة، مما يجعل التيار I_s فى اتفاق مرحلى تقريبا مع كل من E_1 (كمولد) و E_2 (كمحرك) .

تسرى قدرة التزامن ، بنفس الطريقة وتحت نفس الظروف السابق ذكرها ،

عندما يشترك المولدان فى تغذية حمل مشترك . وفى هذه الحالة تعمل هذه القدرة على تخفيف الحمل عن الآلة التى ابطأت ، وزيادة الحمل على الآلة الأخرى ، مما يعمل على إعادة توازن كل منهما . يبين شكل (٦ — ٤ د) كيف يزداد الحمل على الآلة الاولى ، بزيادة قيمة التيار فيها من I_1 إلى I'_1 ، وزيادة معامل قدرته فى نفس الوقت ، وكيف يقل التيار فى الآلة الثانية من I_2 إلى I'_2 ، وينخفض معامل قدرته ، مما يؤدى إلى تقليل نصيبها من الحمل . ويتم التعديل فى قيمة التيار ومعامل قدرته فى الآلتين بفعل تيار التزامن I_s ، الذى يمر فى الدائرة الداخلية بين الآلتين ، دون أن يؤثر على تيار الحمل الخارجى I فى شىء .

ينطبق التحليل السابق على مولدين متماثلين ، عند ضبط تيار التنبيه على نفس القيمة فى كل منهما ($E_1 = E_2$) . ونستطيع عموما تشغيل مولدين على التوازى معا ، وذلك على الرغم من اختلافهما فى كل شىء ، إبتداء من معاوقة التزامن والقوة الدافعة الكهربية فى كل منهما ، إلى منحنى تنظيم السرعة الذى يتوقف شكله على ضبط منظم الآلة المحركة (Governor of primemover) . ويؤثر مجرى منحنى خواص المنظم (Governor characteristic) لكل مولد على تقسيم الحمل بين المولدين . ومن المعتاد أن نحصل على الحمل الكامل من كل آلة عند سرعة التزامن ، كما هو مبين فى شكل (٧ — ٤) ، بالنسبة لمنحنى خواص المنظم 1 ، 2 ، للآلتين 1 ، 2 على التوالى . فاذا اختلفت السرعة عن ذلك ، تغير نصيب كل من الآلتين من الحمل ، على حسب مجرى منحنى خواص المنظم لكل منهما ، كما هو مبين على نفس الشكل .

إذا فرضنا أن الآلتين تتفقان فى مجرى منحنى خواص المنظم ، وأن E_1 لاتساوى E_2 ، وكذلك Z_1 لاتساوى Z_2 ، وأنهما موصلتان على التوازى على



شكل (٧ — ٤)

نفس الحمل Z الذى يأخذ التيار I عند الضغط V كما هو مبين فى شكل (٦ — ٤أ)، بحيث يكون التيار الذى تعطيه الآلة الأولى I_1 ، والتيار الذى تعطيه الآلة الثانية I_2 ، وذلك عندما تكون كل منهما دائرة بسرعة التزامن (أى عند عدم وجود أى إخلال فى التوازن فيكون $I_2 = 0$) ، نجد أن :

$$\dot{V} = \dot{E}_1 - \dot{I}_1 \dot{Z}_1 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \dot{Z}_2 = \dot{I}\,\dot{Z}$$

$$\dot{E}_1 - \dot{E}_2 = \dot{I}_1 \dot{Z}_1 - \dot{I}_2 \dot{Z}_2 \quad , \quad \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \dot{Z}_2 + \dot{I}\,\dot{Z} = \dot{I}_2 (\dot{Z}_2 + \dot{Z}) + \dot{I}_1 \dot{Z}$$

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_1 \dot{Z}_1 + \dot{I}\,\dot{Z} = \dot{I}_1 (\dot{Z}_1 + \dot{Z}) + \dot{I}_2 \dot{Z}$$

بحل المعادلتين السابقتين فى I_1 ، I_2 نحصل عليهما كما يأتى :

$$\dot{I}_1 = \frac{(\dot{E}_1 - \dot{E}_2)\dot{Z} + \dot{E}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) + \dot{Z}_1 \dot{Z}_2} ,$$

$$\dot{I}_2 = \frac{(\dot{E}_2 - \dot{E}_1)\dot{Z} + \dot{E}_2 \dot{Z}_1}{\dot{Z}(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) + \dot{Z}_1 \dot{Z}_2}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_1 \dot{Z}_2 + \dot{E}_2 \dot{Z}_1}{\dot{Z}(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) + \dot{Z}_1 \dot{Z}_2} \quad \text{.......} \quad (٤-١٦)$$

$$\dot{V} = \dot{I}\,\dot{Z} = \frac{\dot{E}_1 \dot{Z}_2 + \dot{E}_2 \dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + (\dot{Z}_1 \dot{Z}_2/\dot{Z})} \quad \text{..........} \quad (٤-١٧)$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1 - \dot{V}}{\dot{Z}_1} , \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2 - \dot{V}}{\dot{Z}_2} \quad (٤-١٨)$$

$$\dot{I}_s = \frac{(\dot{E}_1 - \dot{E}_2)}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + (\dot{Z}_1 \dot{Z}_2/\dot{Z})} \quad \text{..........} \quad (٤-١٩)$$

مثال محلول (١) :

Two 3 - phase synchronous generators are supplyin a load impedance of 20 + j 10 Ω in perallel. The excitation of each machine is adjusted untill the e.m f. induced per phase is 2200 volts in both. The synchronous impedance of the first machine is 0.4 + j 6.0 Ω, and that of the second one is 0.5 + j 8.0 Ω . Find the terminal voltage, the current supplied by each machine, its power output, and the circulating current for a phasee divergence of 20° (electrical). Calculate the corresponding values, when the e.m.f s are in phase.

إذا فرضنا أن E_1 تنطبق على المحور المرجعى (reference axis) ، فمعنى هذا أن E_2 متأخرة بزاوية مقدارها 20 درجة كهربية ، عندما يحدث الاختلاف المرحلى المنصوص عليه . وفى هذه الحالة نجد أن :

$$\dot{E}_1 = 2200 \quad , \quad \dot{E}_2 = 2200 \underline{|-20} = 2065 - j\,800$$

$$\dot{E}_1 - \dot{E}_2 = 135 + j\,800 \quad , \quad \dot{E}_2 - \dot{E}_1 = -135 - j800$$

$$(\dot{E}_1 - \dot{E}_2)\,\dot{Z} = (135 + j\,800).\,(20 + j\,10)$$

$$= -5300 + j\,17350$$

$$(\dot{E}_2 - \dot{E}_1)\,\dot{Z} = 5300 - j\,17350$$

$$\dot{E}_1 Z_2 = 2200\,(0.5 + j\,8) = 1100 + j\,17600$$

$$\dot{E}_2 \dot{Z}_1 = (2065 - j\,800)\,(0.4 + j\,6.0) = 5626 + j\,12070$$

$$\dot{E}_1 \dot{Z}_2 + \dot{E}_2 \dot{Z}_1 = 6726 + j\,29670$$

$$\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 = 0.9 + j\,14.0 \quad , \quad \dot{Z}_1 Z_2 = -47.8 + 6.2\,j$$

$$\dot{Z}\,\dot{Z}_1 = -52 + j\,124 \quad , \quad \dot{Z}\,\dot{Z}_2 = -70 + j\,165$$

$$\frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}} = -1{\cdot}785 + j\,1.24 \quad ,$$

$$\dot{Z}\,(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2) + \dot{Z}_1 Z_2 = -169.8 + j\,295.2$$

$$\dot{I}_1 = \frac{-5300 + j\,17350 + 1100 + j\,17600}{-169.8 + j\,295.2}$$

$$= \frac{-4200 + j\,34950}{-169.8 + j\,295.2}$$

$$= \frac{11112000 - j\,4684000}{115700} = 95.95 - j\,40.5$$

$$= 104.25 \;|\underline{-23^\circ}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{5300 - j\,17350 + 5626 + j\,12070}{-169.8 + j\,295.2}$$

$$= \frac{10926 - j\,5280}{-169.8 + j\,295.2}$$

$$= \frac{-3412000 - j\,2324000}{115700} = -29.5 - j\,20.1$$

$$= 35.7 \;|\underline{-145.6^\circ}$$

$$\dot{I} = 66.45 - j\,60.6 = 90 \;|\underline{-42.5^\circ}$$

$$\dot{V} = (66.45 - j\,60.6)(20 + j\,10) = 1929.6 - j\,535.5$$

$$= 1997 \;|\underline{-15.5^\circ}$$

$$P_1 = 3VI_1 \cos 7.5 = 3 \times 1997 \times 104.25 \times 0.9914$$

$$= 618500 \text{ W}$$

$$P_2 = 3VI_2 \cos 130.1 = 3 \times 1997 \times 35.7 \times -0.6428$$

$$= -137200 \text{ W}$$

$$P = 3VI \cos 27 = 3 \times 1997 \times 90 \times 0.819$$

$$= 481300 \text{ W}$$

$$\dot{I}_s = \frac{135 + j\,800}{0.9 + j\,14.0 - 1.785 + j\,1.24}$$

$$= \frac{135 + j\,800}{-0.685 + j\,16.24}$$

$$= \frac{12297.4 - j\,2606}{232.5} = 52.8 - j\,11.22$$

$$= 54 \angle -12^\circ$$

المعنى الذى تعبر عنه القدرة السالبة P_2 ، للآلة الثانية ، أنها أصبحت تعمل كمحرك ، نتيجة للاختلاف المرحلى بين القوة الدافعة الكهربية التى تولدها ، والقوة الدافعة الكهربية التى تولدها الآلة الأولى (E_2 متأخرة عن E_1 بزاوية مقدارها 20 درجة كهربية) . لذلك أصبح لزاما على الآلة الأولى ، التى تعمل كمولد ، أن تغذى الحمل بالقدرة P ، ومقدارها 481300 W ، وتغذى الآلة الثانية كمحرك بالقدرة P_2 ، ومقدارها 137200 W ، فتصبح قدرتها 618500 W . هذا ويؤدى حدوث الاختلاف المرحلى بين القوتين الدافعتين فى الآلتين إلى نشوء قدرة تزامن تعمل على إعادة الأمور إلى نصابها الصحيح ، كما سبق شرحه ، فتنتج الآلة الأولى قدرة التزامن P_{s1} ، التى تعمل على إبطاء سرعتها (كمولد) ، وتأخذ الآلة الثانية قدرة التزامن P_{s2} ، التى تعمل على زيادة سرعتها (كمحرك) ، حيث :

$$P_{s1} = 3\; E_1 I_s \cos \phi \,(E_1 , I_s)$$

$$= 3 \times 2200 \times 54 \cos 12 = 348000 \quad W$$

$$P_{s2} = 3 E_2 I_s \cos \phi \,(E_2 , I_s) = 354000 \quad W$$

عندما تكون E_1 فى اتفاق مرحلى مع E_2 (وهى حالة التشغيل المعتادة عند عدم وجود أية متاعب أو أخطاء) يصبح $E_2 - E_1 = 0$ ، ونحصل على التيارات بأخذ ذلك فى الاعتبار بالنسبة للمعادلات من (١٦ — ٤) إلى (١٩ — ٤) ،

فنجد أن :

$$\dot{I}_1 = \frac{1100 + j\,17600}{-169.8 + j\,295.2} = \frac{4998800 - j\,3304000}{115700}$$

$$= 43.15 - j\,28.55 = 51.75 \,\underline{|-33.5^\circ}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{880 + j\,13200}{-169.8 + j\,295.2} = \frac{3740700 - j\,2494500}{115700}$$

$$= 32.3 - j\,21.5 = 38.7 \,\underline{|-34^\circ}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 75.45 - 50.05 = 90.5 \,\underline{|-34^\circ}$$

$$\dot{V} = \dot{I}\,\dot{Z} = (75.45 - j\,50.05)\,(20 + j\,10)$$

$$= 2009 - j\,246.5$$

$$= 2020 \,\underline{|-70^\circ}$$

$$P_1 = 3 \times 2020 \times 51.75 \cos 26.5 = 280000 \text{ W}$$

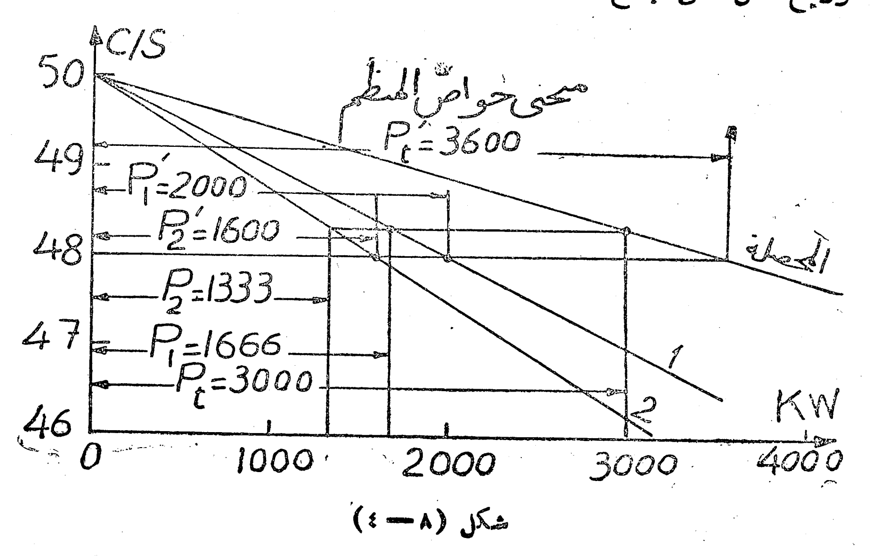
$$P_2 = 3 \times 2020 \times 38.8 \cos 27 = 209000 \text{ W}$$

$$P = 3 \times 2020 \times 90.5 \cos 27 = 487000 \text{ W}$$

مثال محلول (٢) :

Two identical 2000 KVA alternators operate in parallel. The governor of the first machine is such that the frequency drops uniformly from 50 cycles on no load to 48 cycles on full load. The corresponding uniform speed drop of the second machine is 50 to 47.5 cycles. (a) How will the two machines share a load of 3000 Kw ? (b) What is the maximum load at unity power factor that can be delivered without over—loading either machine ?

نرسم منحنى خواص المنظم لكل آلة ، الذى هو عبارة عن خط مستقيم فى هذه الحالة . ويتحدد الخط الأول ، للآلة الأولى بالنقطتين (50,0) ، (48,2000) كما يتحدد الخط الثانى ، للآلة الثانية بالنقطتين (50,0) ، (47.5,2000) ، ثم نجمع الاحداثيين الأفقيين لهذين المنحنيين عند تردد معين ، للحصول على نقطة على المنحنى المحصل عند نفس التردد ، كما هو مبين فى شكل (٨ — ٤) . لإيجاد توزيع الحمل الكلى البالغ 3000 KW نعين النقطة المناظرة لهذا الحمل على المنحنى



شكل (٨ — ٤)

المحصل ، ثم نرسم خطا أفقيا لتحديد الحمل على كل آلة ، كما هو مبين فى شكل (٨ — ٤) . يلاحظ أن الآلة الأولى تأخذ حملا أكبر من الآلة الثانية دائما ، لأن معدل هبوط التردد فيها مع الحمل أقل من الثانية . فلكى نوزع الحمل 3600KW على الآلتين ، دون تعدى الحمل على احداهما عن الحمل الكامل ، يراعى أن تأخذ الآلة الأولى 2000 KW فقط ، كحد أقصى للحمل عليها ، ثم يحدد الحمل على الآلة الثانية بنفس الطريقة السابقة ، ونجد أنه يبلغ 1600 KW فى هذه الحالة . أنظر شكل (٨ — ٤) .

ثالثاً – الآلة المتزامنة على قضبان لانهائية

The synchronous machine on infinite bus-bars

القضبان اللانهائية : (Infinite bus-bars)

بدأت عملية توليد القدرة الكهربية (generation of electric power) على نطاق ضيق ، باستخدام وحدات صغيرة ، تتكون كل منها من مولد كهربائي محدود القدرة ، يدور بوساطة آلة حرارية ، وهي التي تحول الوقود إلى طاقة ميكانيكية تعطيها للمولد على عمود الإدارة ، لكي يحولها بدوره إلى طاقة كهربية . وقد كان تقنين هذه الوحدات يتم على أساس حمل معين ، كإنارة منطقة صغيرة ، أو تغذية عدد من المحركات الكهربية ، إلى غير ذلك من المهام المحدودة ، التي تنفذ في نطاق ضيق .

ومع ازدياد استخدام القدرة الكهربية في الأغراض الصناعية ، والاستخدامات المنزلية والعامة ، بدأت تزداد حجوم وحـــدات التوليد ، ثم تطور الأمر إلى تركيز توليد القدرة الكهربية في محطات كبيرة ، ونقل هذه القدرة وتوزيعها في مناطق استخدامها ، إذ وجد أن ذلك يكون أكثر كفاءة وينتج الطاقة الكهربية بسعر أقل . كما أن استخدام القدرة الهيدروليكية من مساقط توليد المياه ، كقوة محركة للمولدات ، فرض علينا توليد القدرة الكهربية على نطاق كبير جدا عند هذه المساقط ، ثم نقل هذه القدرة ، وتوزيعها بعد ذلك .

ونظراً لزيادة الأحمال بدرجة كبيرة على بعض المحطات الكبيرة ، بما يزيد عن سعتها ، في بعض الأوقات ، في الوقت الذي تكون فيه الأحمال ، على محطات أخرى كبيرة أيضا ، أقل من سعتها بكثير ، فقد نشأت فكرة عمل الترابط بين

الكبيرة (Interconnection between stations) ، لكى يمكن توزيع الأحمال الزائدة عليها جميعاً ، بحيث لايتعدى الحمل ، فى أى وقت، على أى منها ، حملها الكامل . بذلك يصبح عندنا فى النهاية شبكة واحدة مترابطة من المحطات الكبيرة ، تتمثل فى قضبان عمومية ، تتصل بها وتغذيها جميع وحدات التوليد فى جميع المحطات . ويكون مقنن قدرة هذه القضبان كبيراً جداً ، ويساوى مجموع مقنن قدرات الوحدات فى جميع المحطات ، بحيث تتضاءل قدرة أية وحدة من هذه الوحدات بالنسبة إلى قيمة القدرة الهائلة المتجمعة على تلك القضبان. مثل هذه القضبان العمومية تسمى القضبان اللانهائية . ويلاحظ أنه، بناء على صغر قيمة قدرة الوحدة الواحدة ، بالنسبة لقيمة القدرة المتجمعة على القضبان اللانهائية ، فان توصيل هذه الوحدة ، أو فصلها عن القضبان ، لايمكن أن يؤثر ، بأية حال من الأحوال ، فى قيمة ضغط هذه القضبان وترددها . هذا إلى جانب وجود أدوات وأجهزة تعمل أيضا على حفظ الضغط والتردد ثابتين لهذه القضبان . لذلك يطلق على القضبان اللانهائية أيضا اسم القضبان ذات الضغط والتردد الثابتين (constant voltage constant frequency bus-bars)

ويختلف سلوك الآلة المتزامنة ، وخواص تشغيلها ، عندما تساعد فى تغذية الحمل ، بتوصيلها على قضبان لانهائية ، حيث تصبح بذلك متصلة على التوازى مع جميع مولدات الوحدات الأخرى الموصلة على هذه القضبان ، اختلافا تاما عن سلوكها ، وخواص تشغيلها ، عندما تعمل على حمل منفصل ، أو تتصل على التوازى مع آلة أخرى لتغذية حمل منفصل . وينشأ هذا الاختلاف من النواحى الآتية :

أولا — يمكن تغيير الضغط المرحلى على أطراف الآلة ، وتغيير تيار الحمل كذلك ، بتغيير تيار تنبيه الآلة (مما يؤدى إلى تغيير القوة الدافعة الكهربية المتولدة

فيها E_o) ، إذا كانت الآلة تغذى حملا منفصلا ، بينما لا يمكن تغيير الضغط المرحلى على أطراف الآلة ، المتصلة بالقضبان اللانهائية ، لأن ضغط هذه القضبان لا يتأثر بأية تغييرات تحدث فى الآلة ، كما أن هناك إلى جانب ذلك ما يعمل على حفظه ثابتاً ، كما سبق شرحه . هذا ويؤدى تغيير تيار التنبيه ، فى الآلة المتصلة بالقضبان اللانهائية ، إلى عمل تغييرات أخرى بالنسبة لخواص تشغيل الآلة ، كما سيأتى ذكره فيما بعد .

ثانيا — يتحدد معامل القدرة فى الآلة التى تعمل على حمل منفصل بناء على نوع هذا الحمل ، من حيث نسبة الممانعة الحثية أو السعوية فيه إلى المقاومة ، بينما يمكن ضبط معامل القدرة على قيمة معينة ، فى حالة الآلة المتصلة بالقضبان اللانهائية ، عن طريق تغيير تيار التنبيه ، كما سوف يتضح فيما بعد .

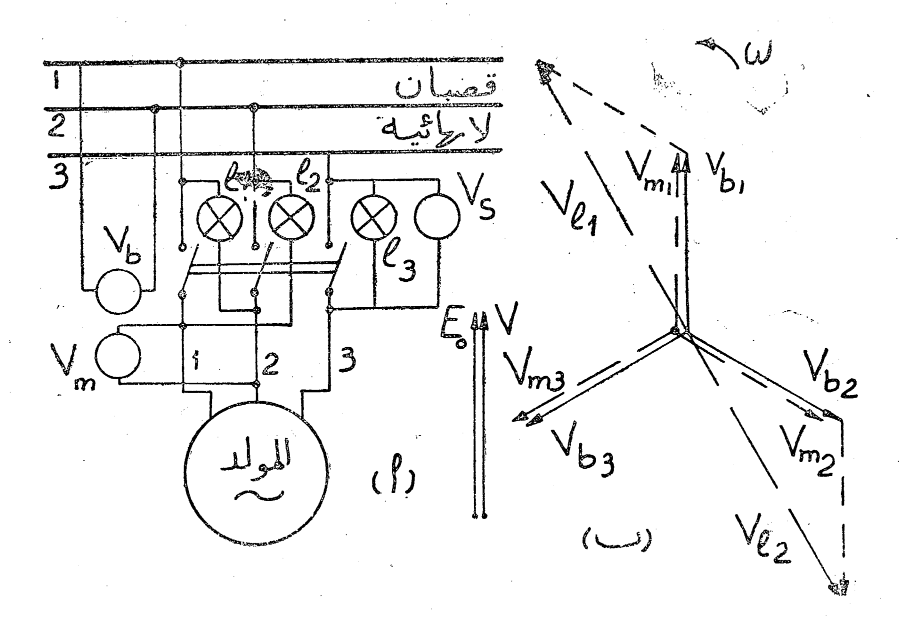
ثالثا — يمكننا بدء تشغيل الآلة التى تغذى حملا منفصلا ، وهى موصلة إلى هذا الحمل ، دون اتخاذ احتياطات معينة ، بينما يستدعى الأمر ، بالنسبة للآلة التى يراد توصيلها إلى قضبان لانهائية ، أن تمر الآلة بعملية معينة ، يطلق عليها اسم عملية التزامن (Synchronization) ، تنفذ بكل دقة ، وتستنفذ مجهوداً ووقتا ، وذلك قبل توصيل الآلة إلى القضبان .

عملية التزامن (Synchronization) :

يجب قبل توصيل الآلة المتزامنة إلى القضبان اللانهائية توافر الشروط الاتية :

١ — أن يكون الضغط المرحلى عند أطراف الآلة مساويا للضغط المرحلى V للقضبان اللانهائية . وحيث أن الآلة لا يمر فيها تيار فى هذه الحالة ، فمعنى هذا

أن القوة الدافعة الكهربية المرحلية E_o ،المتولدة فى الآلة بفعل الأمبير لفات AT_p على كل قطب من الأقطاب، يجب أن تساوى فى القيمة وتتفق مرحلياً مع V ، كما هو مبين فى شكل (٩ — ٤) .



شكل (٩ — ٤)

٢ — أن تكون قيمة تردد الآلة $\frac{pn_s}{60}$ ، عندما تدور بسرعة التزامن n_s لفة فى الدقيقة ، مساوية لتردد القضبان اللانهائية الثابت f ، أى أن $f = \frac{pn_s}{60}$. وهذا يعنى أن تثبت الآلة على الدوران بسرعة التزامن n_s ولا تحيد عنها .

٣ — أن يكون توصيل أطراف الآلة إلى القضبان بالتعاقب المرحلى المضبوط ، بمعنى أن طرف المرحلة الأولى فى الآلة يوصل إلى القضيب الذى تتصل به أطراف المراحل الأولى فى مولدات الوحدات الأخرى ، وهكذا . ويقال فى هذه الحالة

إن التعاقب المرحلى للآلة يماثل التعاقب المرحلى للقضبان (The machine has the same phase sequence as the bus — bars) ويطلق على العملية ، التى يتم فيها تحضير الآلة بحيث تتوافر لها هذه الشروط ، اسم عملية التزامن . وتبدأ عملية التزامن باعداد الآلة الحرارية نفسها ، وإدارتها لكى تدير المولد ، ثم ضبط الضغط والسرعة ، والمراجعة على صحة التعاقب المرحلى ، قبل قفل مفتاح التزامن ، الذى يصل الآلة بالقضبان اللانهائية . ويتم تنفيذ عملية التزامن بمساعدة أجهزة ، توصل بين الآلة والقضبان اللانهائية ، كما هو مبين فى شكل (٩ — ٤) ، ويستدل منها على مدى توافر الشروط المطلوبة .

يبين شكل (٩ — ٤ أ) كيفية اجراء عملية التزامن بطريقة يطلق عليها عادة اسم طريقة المصابيح المضيئة (Bright lamp method) . توصل المصابيح الثلاثة l_1 , l_2 , l_3 عبر مفتاح التزامن ، بين القضبان اللانهائيه وبين الآلة ، بحيث يوصل المصباح l_1 بين القضيب رقم 1 وطرف الآلة رقم 2 ، ويوصل المصباح الثانى l_2 بين القضيب رقم 2 وطرف الآله رقم 1 ، ثم يوصل المصباح الثالث l_3 بين القضيب رقم 3 وطرف الآلة رقم 3 . ويقال فى هذه الحالة إن المصباحين الأولين موصلان بين القضبان والآلة توصيلا متقاطعا (cross connected) ، بينما يوصل المصباح الثالث بينهما توصيلا مباشرا (direct connected). يبين الفولتمتر V_b الضغط الخطى للقضبان ، بينما يبين V_m الضغط الخطى للآلة ، كما يبين V_s الفرق بين هذين الضغطين . وعندما تكون قراءة V_b تساوى قراءة V_m يتأكد لدينا أن ضغط القضبان يساوى ضغط الآلة ، وفى هذه الحالة تكون قراءة V_s تساوى صفراً . وتبدأ عملية التزامن بضبط قراءات الفولتمترات الثلاثة على هذا النحو ، عن طريق تغيير تيار التنبيه فى الآلة ، مع ضبط سرعة دوران المولد عند سرعة التزامن ، على قدر

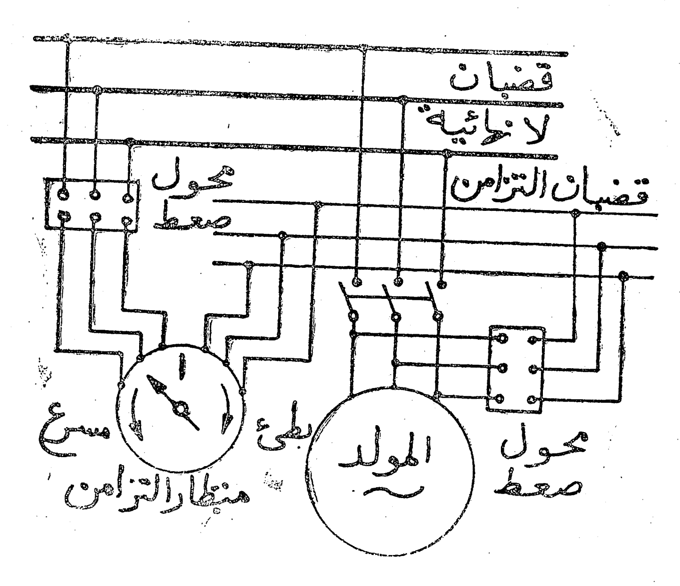
الإمكان . وفى أثناء ذلك يحدث للمصابيح أحد أمرين : ١ — أن تضىء جميعها بطريقة غير منتظمة (Brighten and darken in irregular succession أو ٢ — أن تضىء وتنطفىء بالتتابع بطريقة دورية منتظمة (Brighten and darken in regular succession) ففى الحالة الأولى يكون التعاقب المرحلى للمولد مختلفا عن التعاقب المرحلى للقضبان ، ويلزم لذلك تبديل توصيل أى طرفين من أطراف المولد الثلاثة على مفتاح التزامن ، لكى يصبح التعاقب المرحلى للمولد مماثلا للتعاقب المرحلى للقضبان . أما الحالة الثانية فتعنى أن التعاقب المرحلى متماثل على الناحيتين ، كل ما فى الأمر أن سرعة التزامن ، وبالتالى تردد الآلة ، لم يصل إلى الحد المضبوط بعد ، ويلزم لذلك تقليل السرعة ، أو زيادتها ، على حسب اللزوم ، لكى نصل بقيمة تردد الآلة إلى الحد الذى يساوى فيه تردد القضبان بالضبط . وسوف يتبين لنا من دورية تعاقب إضاءة المصابيح ، واظلامها ، هل الآلة أسرع ، أو أبطأ من اللازم . فيكون تعاقب الإضاءة فى الحالة الأولى بترتيب معين للمصابيح ، وفى الحالة الثانية بالترتيب المضاد . وعندما يستقر الوضع على أن يصبح كل من المصباحين l_2 ، l_1 مضيئا بنفس الدرجة (المعتادة لإضاءته) ، والمصباح l_3 مظلما ، يتأكد لنا أن تردد الآلة قد انضبط ، مع تماثل التعاقب المرحلى على الناحيتين . وباعتبار أننا نكون محافظين طوال الوقت ، عن طريق تغيير تيار التنبيه ، على تساوى ضغط الآلة مع ضغط القضبان ، تكون عملية التزامن قد تمت . ونستطيع حينئذ قفل مفتاح التزامن S ، لكى تصبح الآلة موصلة على القضبان اللانهائية ، دون أن يكون مارا فيها أى تيار ، وبحيث تكون القوة الدافعة الكهربية المرحلية E_0 المتولدة فيها مساوية فى القيمة ، ومتفقة مرحليا ، مع ضغط القضبان المرحلى V . ويقال حينئذ إن الآلة قد أصبحت عائمة (floating) على القضبان ، فهى لا تأخذ منها ، ولا تعطيها شيئا . وسوف نرى

بعد ذلك كيف يمكننا تشغيل الآلة كمولد ، يأخذ قدرة ميكانيكية على عمود الإدارة ، ويحولها إلى قدرة كهربية يعطيها للقضبان ، أو تشغيلها كمحرك ، يأخذ قدرة كهربية من القضبان (المفروض أن قدرتها لانهائية بسبب الترابط بين المحطات ، كما سبق شرحه) ، ويحولها إلى قدرة ميكانيكية يعطيها على عمود الإدارة .

يبين شكل (٩ — ٤ب) الضغوط الموجودة على المصابيح الثلاثة ، عندما تكون السرعة مضبوطة ، والضغوط متساوية ، والتعاقب المرحلى متماثلا على الناحيتين ، حيث تنطبق متجهات ضغوط القضبان المرحلية V_{b3} و V_{b2} و V_{b1} ، على ضغوط الآلة المرحلية V_{m3} و V_{m2} و V_{m1} ، تمام الانطباق . وفى هذه الحالة نجد أن الضغط V_{l1} على المصباح l_1 يساوى الضغط V_{l2} على المصباح l_2 ، وكلا منها يساوى الضغط الخطى ، بينما يكون الضغط على المصباح l_3 يساوى صفراً . وهذا يفسر اطمئناننا إلى صحة الأوضاع تماماً عندما يضىء المصباحان الأولان بنفس الشدة ، ويظلم المصباح الثالث اظلاما تاما . وفى الواقع أننا سوف نجد من العسير جدا ضبط الأمور ، ثم بقائها ، على هذا النحو ، وأن أقصى ما نستطيع التوصل اليه أن تأخذ المصابيح الثلاثة فى الاضاءة والاظلام ، فى تعاقب دورى منتظم ، يكون من البطء ، بحيث يعطينا الفرصة الكافية ، لقفل المفتاح S ، فى الفترة الوجيزة التى تمر على المصابيح وهى فى الحالة المناسبة المشار اليها .

يبين شكل (١٠ — ٤) كيف يستخدم جهاز يسمى منظار التزامن (synchroscope) للمساعدة فى عملية التزامن ، وزيادة التثبت من توافر الشروط المطلوبة . وفى مثل هذه الأحوال يتم اجراء عملية التزامن ، فى المعتاد ، أولا على قضبان تزامن (sychronizing bus — bars) ، حتى نتفادى حدوث أية اضطرابات فى الشبكة الكهربية ، نتيجة لإرتكاب أى خطأ فى خلال العملية .

ويمكن حينئذ استخدام أجهزة آلية تمنع توصيل مفتاح التزامن ، مالم تكن الشروط اللازمة متوافرة تماما . ويتكون منظار التزامن ، بكل بساطة ، من ثلاث ريشات من الحديد ، موجودة على محور واحد ، يفصل بين كل اثنتين منها زاوية مقدارها



شكل (١٠ — ٤)

120 درجة . وهى معرضة لتأثير المجال المغناطيسى المحصل ، الذى ينشأ نتيجة لوجود المجال المغناطيسى الدائر بفعل ضغط القضبان ، مع المجال المغناطيسى الدائر بفعل ضغط الآلة . لذلك يدور مؤشر المنظار فى إتجاه المجال الأسرع ، بحيث يمكن معرفة هل الآلة مسرعة أو مبطئة عن الحد اللازم . ويتحدد ذلك بناء على دوران المؤشر ، فى أى من الاتجاهين المتضادين ، بالنسبة لعلامة واضحة ، يكون وقوف المؤشر عندها دليلا على استقرار الأمور على الوضع الصحيح .

ضبط قيمة التيار ومعامل القدرة للآلة عندما تعمل كمولد :

بعد أن يتم توصيل الآلة إلى القضبان اللانهائية ، وتصبح عائمة عليها

($\dot{E}_o = \dot{V}$) ، يمكن تشغيلها كمحرك ، أو كمولد ، كما سبق ذكره . ونبين فيما يلى بالتفصيل كيف يتم تغيير قيمة تيار الحمل ، الذى يسرى من الآلة إلى القضبان عندما تعمل كمولد ، أو يسرى من القضبان إلى الآلة عندما تعمـــل كمحرك ، وزاوية اختلافه المرحلى مع الضغط V ، أو معـامل قدرته بمعنى آخـر ، فى كلتـا الحـالتين . وسوف نعتمد فى تحليلاتنـا القـادمة عـلى حقيقتين أسـاسيتين ، سبق استيعابهما ، بالنسبة للآلة المتزامنة . الحقيقة الأولى تتعلق بالمعادلة التى تربط بين القوة الدافعة الكهربية المتولدة فى الآلة $\dot{E}_o$ ، والضغط الطرفى $\dot{V}$ ، وتيار الحمل $\dot{I}$ ومعاوقة التزامن $\dot{Z}_s$ ، التى تعتبر ثابتة ، كما توجد فى مخطط المتجهات ، حيث :

$$\dot{E}_o = \dot{V} + \dot{I}\,\dot{Z}_s \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٤—٢٠)$$

والحقيقة الثانية تتعلق بالمعادلة (١١ — ٣) ، التى تعطى قيمة القوة الدافعـة الكهربية E_o ، وتقرر أنها تتناسب تناسبا طرديا مع كل من سرعة التزامن n_s ، والفيض المغناطيسى الكلى ϕ_o ، الناشىء عن الأمبير لفات على كل قطب رئيسى AT_p .

بوضع هاتين الحقيقتين نصب أعيننا نستنتج أن تعديل التيار $\dot{I}$ ، فى القيمـة وزاوية الإختلاف المرحلى ($\dot{I} = I\underline{|\phi}$) ، لايمكن أن يتم ، بالنسبـة للآلة المتزامنة العائمة على القضبان اللانهائية ، إلا بتعديل $\dot{E}_o$ (قيمة وإتجاها) ، وبالتالى تعديل كل من n_s و ϕ_o ، لأن كل من $\dot{V}$ و $\dot{Z}_s$ ثابت القيمة والإتجاه .

أولا : بالنسبة لتعديل n_s ، نجد أن هذا لايتمشى مع طبيعة الآلة المتزامنة ،

حيث أن من أهم خصائصها ثبوت سرعة التزامن ، بما يتناسب مع ثبوت تردد القضبان الموصلة إليها ($f = \frac{p n_s}{60}$) . ولكن يمكننا مع ذلك الأخذ بمبدأ تغيير السرعة فى فترات تلاشى (transient periods) ، تتعرض لها الآلة وقت التغيير (لحظات قصيرة جداً) ، ثم تعود إلى نصابها الصحيح ، من حيث ثبوت سرعة التزامن عند قيمتها الأصلية ، فى حالتها المستمرة (steady state) . وفى حالة الرغبة فى تغيير السرعة ، عندما تكون الآلة عاملة كمولد ، فان الوسيلة الوحيدة لذلك تكون عن طريق تغيير عزم الدوران المحرك للآلة ، وذلك بضبط المنظم (Governor) فى الآلة الحرارية ، أو التوربينة (تغيير استهلاك الوقود أو دخول البخار أو الماء للتوربينة) . وفى هذه الحالة تتغير سرعة الآلة لحظيا ، بسبب اختلال التوازن بين عزم الدوران المحرك على عمود الإداره ، وعزم الدوران المضاد الناشىء عن رد فعل المنتج ، الممثل فى المجال المغناطيسى الدائر . ويؤدى ذلك فى النهاية إلى اختلاف فى قيمة الزاوية δ التى سبق أن بينا أنها تتوقف على مقدار الحمل الموجود . وهذا كله يعنى أننا نستطيع أن نستعيض عن تغيير السرعة ، للتأثير على $\dot{E}_o$ ، بتغيير ضبط المنظم فى الآلة الحرارية التى تدير المولد ، بحيث ينتج عن ذلك تغيير فى قيمة القدرة الفعالة (active power) التى تعطى للقضبان الرئيسية عن طريق المولد . وفى هذه الحالة ينشأ تغيير أساسى فى قيمة الزاوية δ بالذات .

أما فى حالة الرغبة فى تغيير السرعة ، للتأثير على $\dot{E}_o$ ، عندما تكون الآلة عاملة كمحرك ، فان الأوضاع المناظرة لحالة المولد تستدعى منا ، فى هذه الحالة ، تغيير الحمل الميكانيكى على عمود الإدارة ، لإيجاد الاختلال اللازم بين عزم الدوران المحرك ، الذى يتركز فى المجال المغناطيسى الدائر ، وعزم الدوران

المضاد للحمل ، بحيث ينشأ تغيير لحظى فى السرعة ، يؤدى إلى حدوث التغيير المطلوب فى قيمة الزاويه δ . ثم تستقر الأمور بعد إنقضاء فترة التلاشى ، التى حدث فى خلالها تغيير الحل ، بحيث تكون القدرة الفعالة (active power) التى يأخذها المحرك من القضبـان اللانهـائية فى حالة الإستمرار (steady state) الجديدة ، قد تغيرت عن ذى قبل ، وأصبحت مقابلة للحمل الميكانيكى الجديد .

ثانيا : بالنسبه لتعديل ϕ_o ، ويكون ذلك بتعديل قيمة AT_p ، عن طريق تغيير تيار التنبيه فى الآلة ، نجد أن القدرة الفعالة ، التى يعطيها المولد للقضبان ، أو يأخذها المحرك من القضبان ، لادخل لها بهذا التيار (اللهم إلا من ناحية تغير قيمة القدرة التى تتبدد على شكل حرارة فى ملفات الأقطاب ، بسبب مرور تيار التنبيه فيها ، وهى نسبه ضئيلة جداً من قدرة الآلة ، بحيث لايلتفت اليها فى هذا المجال ، ومن ثم فلا يوجد ما يبرر الإعتقاد بأن له تأثيراً عليها) ولكن إذا استعرضنا تأثير رد فعل المنتج ، كما سبق شرحه ، على قيمة الفيض ϕ_o ، نجد أنها تتأثر أساسا بفعل مركبة التيار غير الفعالة (التى تتوقف عليها قيمة AT_d)، التى تعطى فيضا مغناطيسيا مباشرا ، يطرح من ϕ_o إذا كانت مركبة التيـــار حثية (inductive)، ويجمع مع ϕ_o إذا كانت مركبة التيار سعوية (capacitive). وهذا يعنى أن تغيير تنبيه الآلة (change of excitation) يؤدى إلى تغيير قيمة مركبة التيار غير الفعالة ، وبالتالى قيمة القدرة غير الفعالة ، التى تعطيهـا الآلة للقضبان ، عندما تعمل كمولد ، أو تأخذها من القضبـان ، عندما تعمل كمحرك . وهذا يحمل فى طياته تغييراً أساسيا فى زاوية الإختلاف المرحـلى ϕ بين الضغط V والتيار I ، وبالتالى معامل القدرة الذى تعمل عنده الآلة . هذا ويمكن تلخيص كل ما سبق فى حقيقتين هامتين ، وهما خاصتين بتشغيـل الآلة المتزامنة عـلى

القضبان اللانهائية ، سواء كمولد ، أو كمحرك :

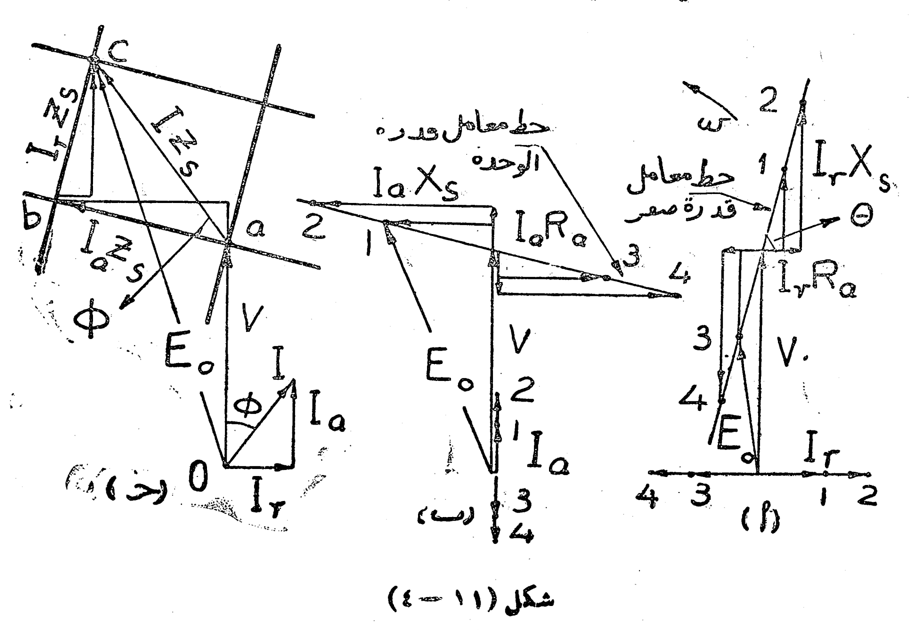
١ — إن تغيير ضبط منظم الآلة الحرارية (adjustment of governor setting) فى حالة المولد ، وتغيير الحمل الميكانيكى على عمود إدارة المحرك ، لا يحدث أى تغيير فى القدرة غير الفعالة (reactive power) ، وإنما يؤدى إلى تغيير القدرة الفعالة (active power) ، التى يعطيها المولد للقضبان ، أو يأخذها المحرك من هذه القضبان . هذا ويستتبع تغيير القدرة الفعالة تغييراً فى مركبة التيار الفعالة ، نظراً لأن الضغط V ثابت القيمة .

٢ — إن تغيير تيار التنبيه للآلة ، أو تنبيه الآلة باختصار ، لا دخل له بالقدرة الفعالة التى يعطيها المولد للقضبان ، أو بالحمل الميكانيكى على عمود إدارة المحرك ، وإنما يعمل على تغيير القدرة غير الفعالة (reactive power) ، التى تسرى من المولد إلى القضبان ، أو يأخذها المحرك من القضبان . هذا ويستتبع تغيير القدرة غير الفعالة تغييراً فى مركبة التيار غير الفعالة ، لأن الضغط V ثابت القيمة .

وفى كلتا الحالتين يحدث تغيير فى معامل القدرة ، أو بمعنى آخر تغيير فى زاوية الاختلاف المرحلى بين الضغط والتيار . ولكن نظراً لأن لمركبة التيار غير الفعالة تأثيراً مباشراً (مضاد أو مع) الفيض المغناطيسى الكلى ϕ_o ، الذى تتوقف عليه قيمة E_o ، نجد أن تغيير التنبيه أبعد أثراً على معامل القدرة من تغيير ضبط وضع المنظم .

يبين شكل (١١ — ٤) كيف تتأثر $\dot{E}_o$ (قيمة واتجاها) بتغيير كل من I_r ، التيار غير الفعال ، و I_a التيار الفعال ، فى الآلة . ففى (أ) نجد أن تغيير التيار

غير الفعال ، عندما يكون التيار الفعال ، وبالتالى القدرة الفعالة ، مساويا للصفر ،



شكل (١١ — ٤)

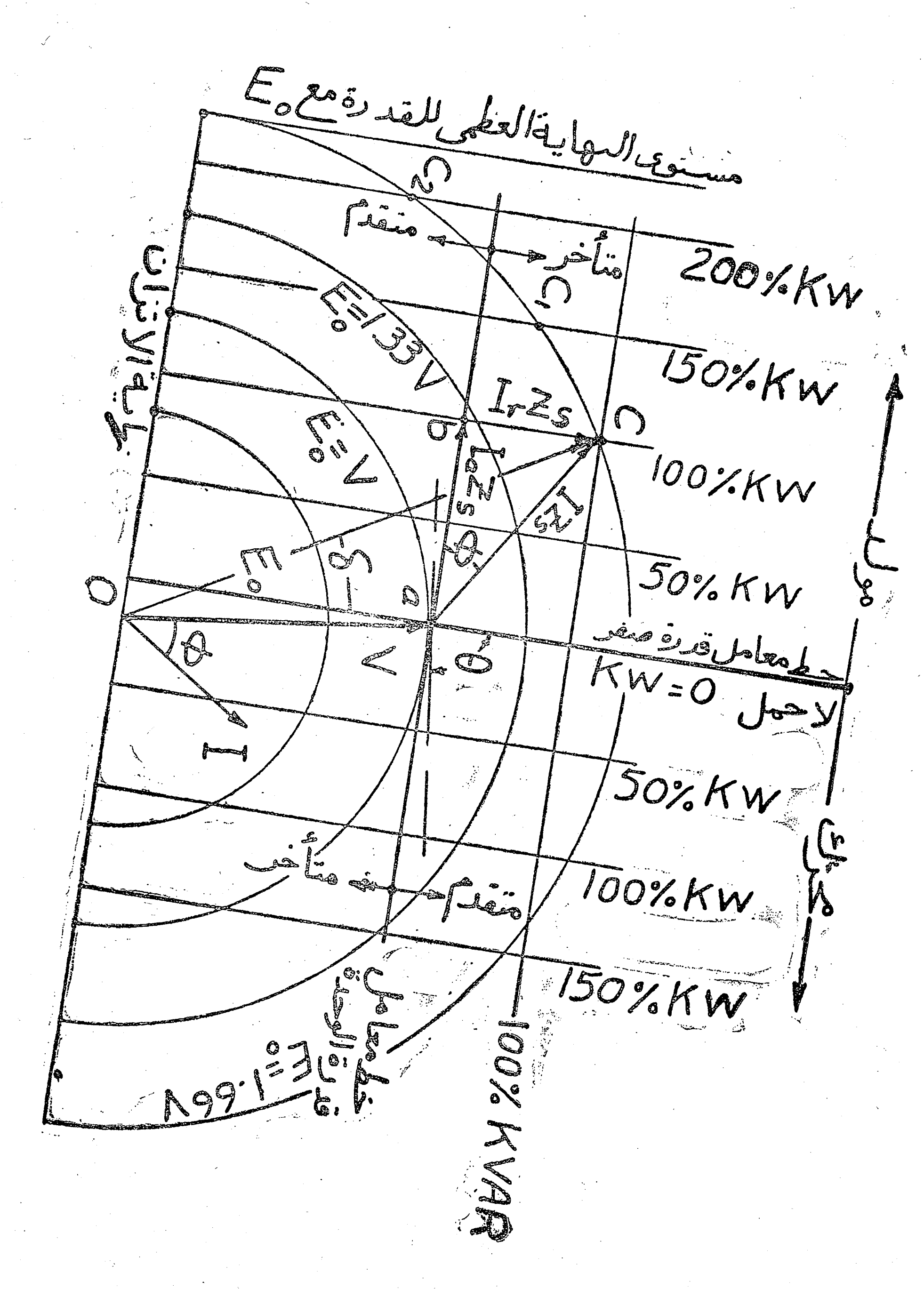
يؤدى إلى تحرك طرف المتجه $\dot{E}_o$ على خط مستقيم يميل على الأفقى بالزاوية $\theta = \tan^{-1} \frac{X_s}{R_a}$. يطلق على هذا الخط اسم خط معامل القدرة صفر (zero power factor line) ، أو خط القدرة الفعالة صفر (zero active power line) ، إذ أنه عبارة عن المحل الهندسى لطرف المتجه $\dot{E}_o$ ، عندما يتغير التيار غير الفعال فى الآلة ، وتتغير القدرة غير الفعالة فى الآلة ، فتتغير القدرة غير الفعالة الداخلة إلى (حالة المولد) ، أو الخارجة من (حالة المحرك)، القضبان اللانهائية ، وتكون القدرة الفعالة ، ومعامل القدرة فى الوقت نفسه ، مساويين للصفر .

وفى (ب) نرى كيف يؤدى تغيير التيار الفعال ، عندما يكون التيار غير

الفعال ، وبالتالى القدرة غير الفعالة ، مساوبين للصفر ، إلى جعل طرف المتجه $\dot{E}_o$ يتحرك على خط عمودى على الخط السابق ، أى يميل على الخط الرأسى بالزاوية θ . ويطلق على هذا الخط اسم خط معامل القدرة الوحدة (unity power factor line) أو خط القدرة غير الفعالة صفر (zero reactive power line) وهو عبارة عن المحل الهندسى لطرف المتجه $\dot{E}_o$ ، عندما يتغير التيار الفعال فى الآلة ، وتتغير القدرة الفعالة الداخلة إلى (حالة المولد) ، أو الخارجة من (حالة المحرك) ، القضبان اللانهائية . وتكون القدرة غير الفعالة مساوية للصفر، ومعامل القدرة مساويا للوحدة .

وفى (ح) نرى كيف تتحدد نقطة تشغيل الآلة ، على حسب تحديد طرف المتجه $\dot{E}_o$ ، على تقاطع خطين يوازى أحدهما خط القدرة الفعالة صفر ، ويوازى الثانى خط القدرة غير الفعالة صفر . ويبعد الخط الأول عن خط القدرة الفعالة صفر بالمسافة التى تمثل $I_a Z_s$ ، أى بما يتناسب مع قيمة المركبة الفعالة للتيار ؛ وبالتالى قيمة القدرة الفعالة فى هذه الحالة . لذلك يمكن اعتبار هذه المسافة ممثلة للقدرة الفعالة بمقياس رسم قدره معين ، واعتبار الخط الأول ممثلا لهذا المستوى من القدرة الفعالة . بمعنى أن طرف $\dot{E}_o$ يتحرك على هذا الخط ، عند ثبوت القدرة الفعالة على هذه القيمة ، وحدوث تغييرات أخرى فى الآلة .

ويبعد الخط الثانى عن خط القدره غير الفعالة صفر بالمسافة التى تمثل $I_r Z_s$ أى بما يتناسب مع قيمة المركبة غير الفعالة للتيار ، وبالتالى قيمة القدره غير الفعالة فى هذه الحالة . لذلك يمكن اعتبار هذه المسافة ممثلة للقدره غير الفعالة بمقياس القدره السابق تعيينه ، واعتبار الخط الثانى ممثلا لهذا المستوى من القدره غير الفعالة . بمعنى أن طرف $\dot{E}_o$ يتحرك على هذا الخط ، عند ثبوت القدرة غير الفعالة على هذه القيمة ،


مستوى النهاية العظمى للقدرة مع E_o
200% KW
150% KW
100% KW
50% KW
KW=0 لاحمل
خط معامل قدرة صفر
50% KW
100% KW
150% KW
100% KVAR
متقدم
متأخر
$E_o = 133V$
$E_o = V$
$I_r Z_s$
$I Z_s$
E_o
V
I
O
C
لإثارة

شكل (١٢ — ٤)

وحدوث تغييرات أخرى فى الآلة .

نستطيع بناء على ماسبق رسم ما يسمى بمخطط الحمل الكهربائى (Electrical load diagram) للآلة ، الذى تتحدد عليه مستويات مختلفة للقدرات الفعالة وغير الفعالة ، بحيث يمكن ، بمعرفة معلومات معينة ، تحديد نقطة تشغيل الآلة عليه ، ثم تتبع ما يحدث لها من تغييرات ، ومعرفة نتائج هذه التغييرات ، بالنسبة لخصائص التشغيل ، على مخطط الحمل بسهولة .

يبين شكل (١٢ — ٤) كيفية رسم مخطط الحمل الكهربائى لآلة متزامنة ، مقاومة ملفات المنتج المرحلية فيها R_a أوم ، ومعاوقة التزامن المرحلية لها X_s أوم ، وتعمل على قضبان لا نهائية ضغطها المرحلى V . ترسم V بمقياس رسم مناسب ، وليكن كل سنتيمتر واحد يساوى m فولت مثلا . عند نهاية V يرسم خط معامل قدرة صفر يصنع الزاوية $\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R_a}$ مع الأفقى ، ثم يرسم خط معامل قدرة الوحدة عموديا عليه . بالنسبة لتيار الحمل I ، الذى يصنع الزاوية φ مع V توجد المركبة الفعالة I_a ، ويكون هبوط الضغط الناشىء عنها $ab = I_a Z_s$ فى إتجاه خط القدرة الوحدة بمقياس رسم الضغط ، والمركبة غير الفعالة I_r ، ويكون هبوط الضغط الناشىء عنها $bc = I_r Z_s$ فى إتجاه يوازى خط معامل القدرة صفر بنفس مقياس رسم الضغط . يعطى الخط المرسوم من b فى إتجاه bc ، موازيا لخط معامل قدرة صفر ، مستوى القدرة الفعالة المناظرة للتيار I_a ، أى $3VI_a$ أو $3VI\cos\phi$. ويعطى الخط المرسوم من c ، موازيا لخط معامل قدره الوحده ، مستوى القدره غير الفعالة المناظرة للتيار I_r ، أى $3VI_r$ أو $3VI\sin\phi$ لذلك يمكن اعتبار ab ممثلا للقدرة الفعالة بمقياس رسم للقدرة ، و bc ممثلا للقدرة غير الفعالة بهذا المقياس ، و ac ممثلا للقدرة الظاهرية (apparant power)

بنفس المقياس . ويكون مقياس رسم القدرة أن كل سم يمثل y وات ، أوفولت أمبير ممانع ، أو فولت أمبير ، على حسب ما إذا كانت القدرة فعالة ، أو غير فعالة ، أو ظاهرية ، على الترتيب ، حيث :

$$y = \frac{3\ Vm}{Z_s}$$

يمكن اعتبار أضلاع المثلث abc ممثلة للتيار ومركبتيه الفعالة وغير الفعالة ، بحيث يمثل ac التيار I ، و bc المركبة غير الفعالة لهذا التيار I_r ، و ab المركبة الفعالة للتيار I_a

ويكون مقياس رسم التيار أن كل اسم يمثل $\frac{m}{Z_s}$ أمبير . هذا ويصنع ac الزاوية φ مع ab بحيث يكون ac أعلى الخط ab ، فى حالة التيار المتأخر ، وأسفل ab فى حالة التيار المتقدم ، فى حالة المولد ، والعكس فى حالة المحرك .

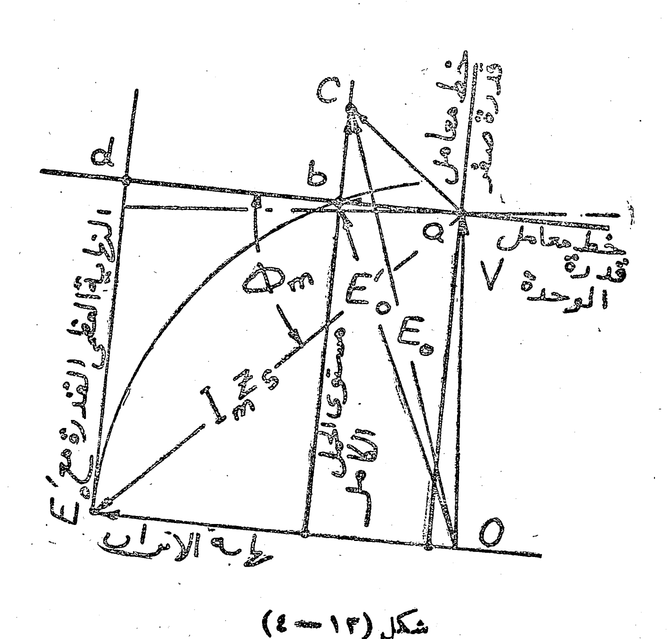
باعتبار أن I هو تيار الحمل الكامل يمكن رسم مستويات القدرة المختلفة ، منسوبة إلى الحمل الكامل ، كما هو مبين فى الشكل ، حيث تمثل c نقطة التشغيل عند الحمل الكامل ، ويمثل Oc ، بمقياس رسم الضغط ، القوة الدافعة الكهربية E_o . ويمكن استخدام الشكل بعد ذلك فى تحديد نقط التشغيل الجديدة ، على حسب مواصفاتها ، كما سوف يتضح من الأمثلة التالية . ويلاحظ فى هذا المضمار أن مستويات القدرة المعطاة تكون ثابتة تماما على الخطوط المناظرة ، كما أننا نحصل ، عند ثبوت قيمة تيار التنبيه ، أو ثبوت التنبيه باختصار ، على دوائر تعطى مستويات تنبيه ثابتة ، منسوبة إلى التنبيه عند الحمل الكامل ، باعتباره 100% ، كما هو مبين على الشكل . ويلاحظ أنه يمكن نقل نقطة التشغيل على مستويات قدرة فعالة مختلفة ، تزداد قيمتها بزيادة قيمة الزاوية δ (من c إلى c_1 إلى c_2 ....) ، حتى تصل إلى نهاية عظمى عند تقاطع الخط المرسوم من O موازيا لخط معامل قدرة الوحدة مع دائرة مستوى التنبيه المناظرة ، وينتج عن

ازدياد قيمة الزاوية δ بعد ذلك انخفاض فى قيمة القدرة (تقاطع دائرة التنبيه مع مستوى أقل للقدرة). وبذلك تكون الآلة قد خالفت قواعد التزامن بالنسبة لعلاقة القدرة بالزاوية δ ، كما تعبر عنها المعادلة (١٢ — ٤) . ويقال فى هذه الحالة إن الآلة قد كسرت حد التزامن (broke out of synhronism) ، كما يطلق على الخط ، الذى يرسم من O موازيا لخط معامل القدرة الوحدة ، خط نهاية الاتزان (Limit of stability line) ، لأنه يمثل فى الواقع الحد الذى تخرج بعده الآلة عن حالة الاتزان . ويلاحظ من الشكل أن مستوى النهاية العظمى للقدرة ، التى يستطيع المولد أن يعطيها للقضبان ، يزداد بازدياد التنبيه ، وبالتالى بازدياد قيمة E_o .

يلاحظ أن خط معامل قدرة صفر ، وخط معامل قدرة الوحدة ، يقسمان مخطط الحمل الكهربائى إلى أربعة أقسام ، حيث يختص القسمان فى الناحية اليسرى من خط معامل قدرة صفر بالمولد ، فيختص الربع الواقع أعلى خط معامل قدرة الوحده بمعاملات القدرة المتأخرة ، والربع الواقع أسفل خط معامل قدره الوحده بمعاملات القدرة المتقدمة . هذا ويختص القسمان فى الناحية اليمنى من خط معامل قدرة صفر بالمحرك ، فيختص الربع الواقع أعلى خط معامل قدره الوحده بمعاملات القدرة المتقدمة ، والربع الواقع أسفل هذا الخط بمعاملات القدرة المتأخره .

ويلاحظ أنه بينما تكون القدرة الكهربية $3VI \cos \phi$ فى حالة المولد هى قدرة الخرج (output) ، فانها تمثل فى حالة المحرك قدرة المدخل (input) . لذلك يختص هذا المخطط بقدرة الخرج فى حالة المولد ، وقدرة المدخل فى حالة المحرك. وعند استخدام هذا المخطط لحل المسائل الخاصة بالمحركات ، يراعى أن إتجاه تيار

المحرك يكون فى عكس إتجاه تيار المولد، بالنسبة للقضبان اللانهائية ، فبينما يكون ساريا من القضبان إلى المحرك فى الحالة الأولى ، يكون ساريا من المولد إلى القضبان فى الحالة الثانية . لذلك يجب عكس إتجاه تيار المحرك ، لكى يمكن تطبيق جميع القواعد السابقة ، عند الرسم على مخطط الحمل ، لتحديد خواص تشغيل المحرك .



شكل (١٣ — ٤)

مثال (١) :

1 — A synchronous generator, which is synchronised and connected to 11000 V, 50 c/s infinite busbars, has to supply 3000 KW at 0.8 power factor lagging. It has a synchronous reactance of 15 ohms and an armature resistance of 1 ohm. Explain, with the aid of a load diagram, how the station operator would proceed to make the machine deliver the required load to the busbars, and find the value of the machine E.M.F in this case. Find the value of the E.M.F at which the

machine would supply the same power at unity power factor. Find for this value of the E.M.F the maximum power and the corresponding power and power factor which the machine would deliver to the busbars before it breaks out of synchronism.

لكى يمكن للآلة أن تعطى الحمل المطلوب للقضبان،عند معامل القدرة المحدد ، يقوم عامل المحطة (station operator) بضبط المنظم للآلة الحرارية ، وضبط تيار التنبيه، بالتتابع خطوة بخطوة ، بحيث يمكن تحميل الآلة تدريجيا بمعاملات قدرة مختلفة ، عند أجزاء الحمل المختلفة ، حتى يتم فى النهاية ضبط التيار ، السارى إلى القضبان ، بقيمته عند الحمل الكامل ، وضبط معامل القدرة المطلوب مع هذا التيار . هذا ويلاحظ أن تغيير قيمة الكيلووات ، المأخوذ من الآلة ، يكون عن طريق تغيير ضبط المنظم ، بينما يكون تغيير معامل القدرة أساسا عن طريق تغيير تنبيه الآلة . ويسترشد العامل فى خلال هذة العملية بقراءات الأجهزة المعدة لهذا الغرض، كما يمكن أن يسترشد أيضا بمخطط الحمـــل الكهربائى للآلة ، إذا كان جاهزاً أمامه .

يبين شكل (١٣ — ٤) مخطط الحمل الكهربائى للآلة ، مرسوما عـــلى أساس المعلومات الآتية :

$$I = \frac{3000}{\sqrt{3} \times 11 \times 0.8} = 196.3\ \text{A} \quad , \quad I_a = 157.2 \ , \quad I_r = 118$$

$$V = \frac{11000}{\sqrt{3}} = 6350\ V$$

$$Z_s = \sqrt{(15)^2 + (1)^2} \simeq 15.05\ \text{ohms}$$

$$I_a Z_s = 2365\ \text{V} \quad , \quad I_r Z_s = 1775\ \text{V}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{15}{1} \simeq 86^\circ\ 12'$$

مقاييس الرسم :

$$1\ \text{cm} = 1000\ \text{V} = \frac{1000}{15.05} \simeq 66.5\ \text{A}$$

$$= \frac{3000 \times 6350}{10^3 \times 15.05} = 1270\ \text{KW}$$

القوة الدافعة الكهربية عند الحمل الكامل :

$$E_o = 8.63\ \text{cms} = 8630\ \ \text{V}$$

لكى تعطى الآلة نفس الحمل الكامل (القدرة الفعالة) ، عند معامل قدرة الوحدة ، يجب أن يتحرك طرف E_o على نفس خط القدرة الفعالة حتى يقع على النقطة b ، فتكون قيمة القوه الدافعه الكهربية فى هذه الحالة هى E'_o يساوى Ob .

$$E'_o = 7\ \text{cms} = 7000\ \ \text{V}$$

قيمة النهاية العظمى للقدرة التى يعطيها المولد للقضبان اللانهائية ، قبل أن يخرج عن حد الاتزان ممثلة بالمسافة ad ، وذلك عندما يكون التنبيه كما هو عند b ، أى مع القوة الدافعة الكهربية E'_o .

$$ad = 6.4\ \text{cms} = 8120\ \ \text{KW}$$

وفى هذه الحالة نجد أن :

$$I_m Z_s = 9.05\ \text{cms} = 9050\ \text{V} \quad , \quad I_m = 600\ \text{A}$$

$$\phi_m = 45^\circ\ \text{leading} \quad , \quad \cos\phi_m = 0.707$$

مثال (٢) :

a 3—phase synchronous generator has the following open circuit characteristic :

Field current (amps) :	0	32	50	75	100	140
open circuit E.M.F/phase :	0	1800	2830	3810	4330	4790

The armature has a resistance of 0.5 ohm and a synchronous reactance of 5 ohms per phase. The machine is synchronised and connected to 6600 volt infinite bus bars to which it delivers 4000 KW, when the field current is adjusted to a value of 130 amperes. Find the machine current and power factor.

If the steam admission is increased by 40 % and the field current is adjusted to 100 amps., find the new values of the machine current and power factor. at what value of the field current would the machine deliver a maximum power of 6500 KW, before it breaks out of synchronism ?

$$V = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3810 \text{ V} \quad , \quad I_a = \frac{4000}{\sqrt{3} \times 6.6} = 350 \text{ A} \; ,$$

$$Z_s = 5.03$$

(أنظر شكل ١٤ — ٤)

عندما يكون تيار التنبيه 130 أمبير نحصل على قوة دافعة كهربية مرحلية من منحنى الدائرة المفتوحة مقدارها $E_o = 4700$ فولت . نأخذ مقاييس الرسم :

$$1 \text{ cm} = 500 \text{ V} = \frac{500}{5.03} = 99.3 \text{ A} = \frac{1500 \times 3810}{5.03 \times 10^3}$$

$$= 1136 \text{ Kw}$$

$I_a Z_s = 1762.5 \text{ V} = 3.53 \text{ cms} \quad , \quad V = 7.62 \text{ cms}$

$\theta = \tan^{-1} \frac{5}{0.5} \cong 84° \; 18' \quad ab = \frac{4000 \text{ KW}}{1136} = 3.53 \text{ cms}$

يمكن تحديد النقطة b باعتبار ab يمثل هبوط الضغط $I_a Z_s$ ، أو باعتباره يمثل قدرة الحمل الفعالة 4000 كيلووات بذلك يتحدد مستوى الحمل الكامل ، الذى يمر بالنقطة b ، ويوازى خط معامل القدرة صفر . النقطه C ، وهى نقطة التشغيل عند الحمل الكامل ، تقع على هذا الخط ، وتتحدد على أساس أن Oc يمثل E_o ، أى أن :

$$OC = \frac{4700}{500} = 9.4 \text{ cms}$$

نحصل من الرسم على النتائج الآتية ، بالنسبة لنقطة التشغيل C :

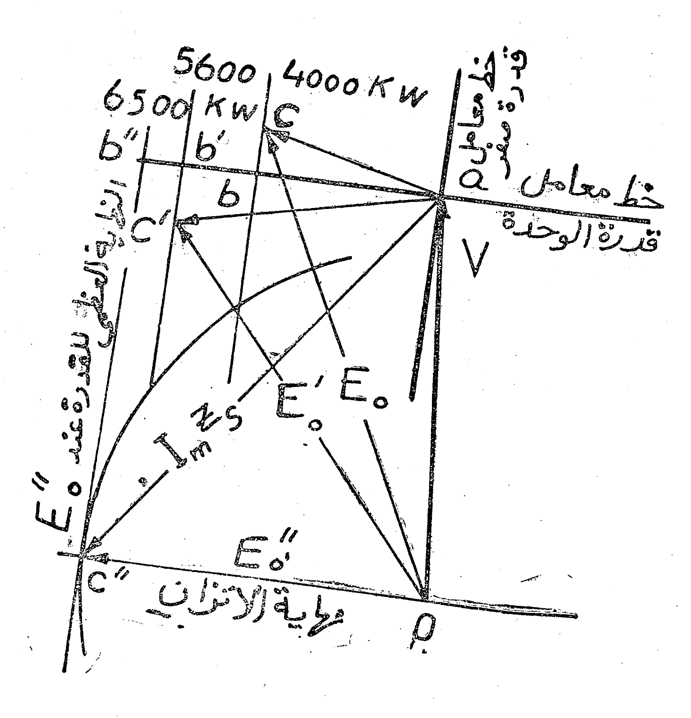
$\phi = 13.5° \quad , \quad \cos \phi = 0.9724 \text{ lagging}$

$IZ_s = 3.6 \text{ cms} = 1800 \text{ V} \quad , \quad I \cong 363 \text{ A}$

عندما يزداد دخول البخار بمقدار % 40 (عن طريق ضبط المنظم) تزداد القدرة الفعالة التى يعطيها المولد للقضبان بحيث تصبح $4000 \times 1.4 = 5600$ كيلووات . وعند ضبط تيار التنبيه على 100 أمبير تصبح قيمة E_o الجديدة ، كما نحصل عليها من منحنى الدائرة المفتوحة هى $4330 = E'_o$. يقع طرف E'_o على خط القدرة 5600 كيلووات ، كما هو مبين فى شكل (١٤ — ٤) ، فتتحدد نقطة التشغيل الجديدة C' . ونحصل من الشكل على النتائج الاتية :

$\phi' = 12.5° \quad , \quad \cos \phi' = 0.9763 \text{ leading}$

$I'Z_s = 5 \text{ cms} = 2500 \text{ V} \quad , \quad I' = 5 \times 99.3 = 496.5 \text{ A}$



شكل (١٤—٤)

برسم خط النهاية العظمى للقدرة على مستوى 6500 كيلووات نجد أن ab'' يساوى $5.7 = \frac{6500}{1136}$ من السنتيمترات ، وتكون E'_o ممثلة فى هذه الحالة بالطول Oc'، بينما يكون $I_m Z_s$ ممثلا بالطول ac'' .

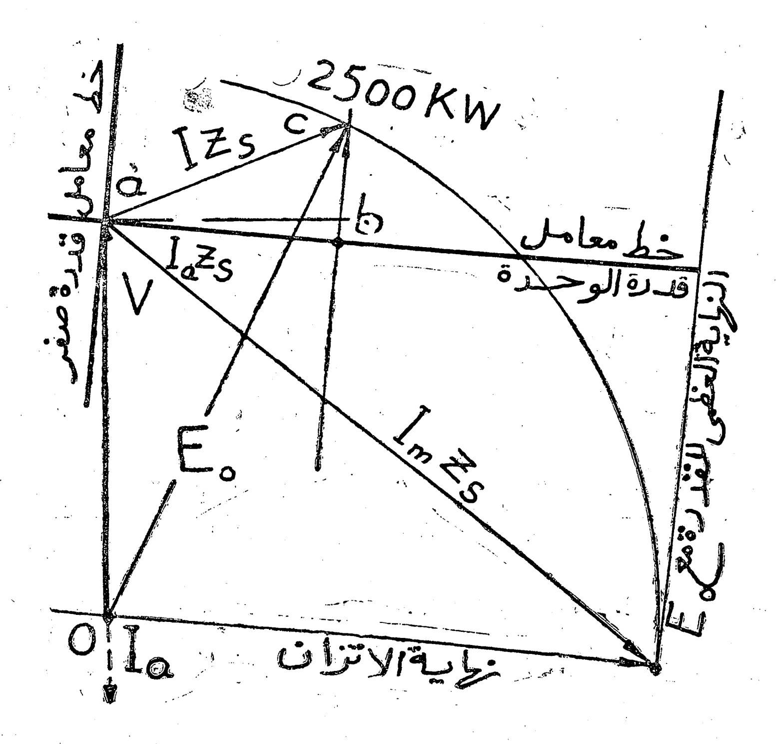
$E'_o = 6.6 \times 500 = 3300$ V , $I_f \simeq 60$ A (تيار التنبيه)

$I_m Z_s = 9.6 \times 500 = 4800$ V . $I_m = 9.6 \times 99.3 \simeq 955$ A

مثال (٣) :

How can the **active** and **reactive** powers, delivered by a synchronous generator to infinite busbars, be changed?

A 3 phase, star connected synchronous generator has an effective resistance and synchronous reactance per phase of 0.75 ohm and 10 ohms respectively. It is connected to 6600 V, 50 c/s infinite busbars to which it delivers 2500 KW. When the induced line E.M.F is adjusted to 9000 V, find the line current and power factor. Find also the stalling curren at this value of excitation and the efficiency, assuming mechanical, iron and excitation losses of 120 KW



شكل (١٥ — ٤)

يبين شكل (١٥ — ٤) كيفية رسم مخطط الحمل الكهربائى فى هذه الحالة ، وذلك باستخدام تيار مضاد فى الاتجاه لتيار المولد .

$$I_a = \frac{2500}{\sqrt{3} \times 6.6} = 219 \text{ A} \quad ,$$

$$V = \frac{6600}{\sqrt{3}} = 3810 \text{ V} \quad , \quad Z_s = 10.03 \ \Omega$$

$$E_o = \frac{9000}{\sqrt{3}} = 5200 \text{ V} \quad ,$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{10}{0.75} = 85^\circ \ 43'$$

مقاييس الرسم :

$$1 \text{ cm} = 500 \text{ V} = \frac{500}{10.03} = 49.7 \text{ A} = \frac{1500 \times 3810}{10.03 \times 10^3}$$

$$= 570 \text{ KW}$$

يمكن تحديد النقطة b باعتبار ab ممثلا للتيار I_a بمقياس رسم التيار ، أو ممثلا للضغط $I_a Z_s$ بمقياس رسم الضغط ، أو ممثلا للقدرة الفعالة KW بمقياس رسم القدرة ، فنجد أن :

$$ab = \frac{219}{49.7} = \frac{2500}{570} = \frac{219 \times 10.03}{500} = 4.4 \text{ cms}$$

يرسم من b خط مستوى القدرة الفعاله 2500 كيلووات ، يوازى خط معامل القدرة صفر ، وتتحدد عليه نقطة التشغيل عند الحمل الكامل c ، بحيث يكون Oc ممثلا للقوة الدافعة الكهربية E_o ، حيث يكون Oc مساويا 10,4 من السنتيمترات $\left(= \frac{5200}{500} \right)$ نحصل من الشكل على التيار I (يمثله ac بمقياس رسم التيار) ، وزاوية الاختلاف المرحلي ϕ ، ومعامل القدرة ، حيث :

$$I = 245 \ A \quad , \quad \cos \phi = 0.90 \ \text{leading}$$

تيار التوقف (stalling current) هو أقصى قيمة للتيار يستطيع المحرك أن يأخذها من الينبوع قبل خروجه عن حد الاتزان مباشرة ، أى أنه هو التيار I_m المناظر لقيمة النهاية العظمى للقدرة مع E_o المعطاه ، ونحصل عليه بطريقة مماثلة لتلك التي حصلنا بها عليه فى حالة المولد ، كما هو مبين فى شكل (١٥ — ٤) .

$$I_m = 672 \ A \quad , \quad \cos \phi_m = 0.837 \ \text{lagging}$$

لحساب معامل الجودة نحسب المفقودات النحاسية I^2R_a :

$$I^2 R_a = (245)^2 \times 0.75 \times 10^{-3} = 45 \quad KW$$

المفقودات الكلية :

$$120 + 45 = 165 \quad KW$$

$$\eta = \frac{2500}{2500 + 165} = 0.937 = 93.7 \quad \%$$

المحرك المتزامن على القضبان اللانهائية :

(Synchronous motor on infinite bus - bars)

يمكننا أن نجعل الآلة المتزامنة العائمة على القضبان اللانهائية ، بعد إجراء عملية التزامن وقفل مفتاح التزامن ، تعمل كمولد أو كمحرك . ففى الحالة الأولى تغذى الآلة بالقدرة الميكانيكية على عمود الادارة ، مما يؤدى إلى تقدم محاور الأقطاب الرئيسية ، على محاور المجال المغناطيسى لرد فعل المنتج ، بالزاوية المناظرة δ (موجبة فى هذه الحالة) ، وفى الحالة الثانية يوضع حمل ميكانيكى على عمود الإدارة ، مما يؤدى إلى تأخر محاور الأقطاب الرئيسية ، عن محاور المجال المغناطيسى

لرد فعل المنتج، بالزاوية المناظرة δ (سالبة فى هذه الحالة) . وعندما تعمل الآلة كمحرك فانها تأخذ قدرة مدخل من القضبان اللانهائية مقدارها $3\ VI\cos\phi$ ، حيث ϕ هى زاوية الاختلاف المرحلى بين ضغط القضبان الثابت ، وتيار الحمل الذى تسحبه الآلة من هذه القضبان . وقد سبق أن بينا أننا نستطيع ، عند عكس اتجاه التيار ، استخدام مخطط الحمل الكهربائى ، بالنسبة لقدرة المدخل فى حالة المحرك ، بنفس الطريقة التى استخدم بها فى حالة المولد . ويعنى عكس إتجاه التيار هنا أن تأثير تيار المحرك معاكس لتأثير تيار المولد ، إذ بينما يعطى التيار المتأخر فى حالة المولد ، تأثيراً مغناطيسيا مضادا (demagnetising effect) على الأقطاب الرئيسية ، نجد أن التيار المتأخر يعطى تأثيرا مغناطيسيا مساعدا (magnetising effect) ، فى حالة المحرك . لذلك نجد أن E_o أكبر من V فى المولد ، و E_o أصغر من V فى المحرك ، عندما يكون التيار متأخرا ، كما يتضح من مخطط الحمل الكهربائى . وبالعكس نجد أنه عندما يكون التيار متقدما ، فان E_o تكون أصغر من V فى حالة المولد ، نتيجة للتأثير المغناطيسى المساعد لتيار الحمل على الأقطاب الرئيسية ، وتكون E_o أكبر من V فى حالة المحرك ، نتيجة لتأثير التيار المغناطيسى المضاد على الأقطاب الرئيسية .

نخرج مما سبق بنتيجة هامة ، بالنسبة للمحرك المتزامن ، وهى أننا نستطيع أن نجعل هذا المحرك يسحب تيارا سعويا (متقدما على الضغط) من القضبان ، بزيادة تيار التنبيه ، بحيث تصبح E_o أكبر من V . ويوصف المحرك فى هذه الحالة بأنه يعمل بتنبيه زائد (overexcited) ، وهو يعمل ، بالتيار السعوى الذى يسحبه من القضبان ، على تحسين معامل القدرة (power — factor Improvement) إذا كانت الأحمال الأخرى على القضبان معظمها حثية . لذلك

تستخدم المحركات المتزامنة لتحسين معامل القدرة فى خطوط النقل الكهربائية ، فيوصل محرك متزامن عند نقطه الاستقبال (receiving end) فى الخط ، أو عند مركز ثقل الأحمال (centre of gravity of load) ، ويدار بدون حمل ، وبتنبيه زائد ، لكى يعمل على تحسين معامل القدرة ، مما يؤدى إلى خفض قيمة هبوط الضغط فى الخط ، وبالتالى تحسين معامل التنظيم لهذا الخط . ويطلق على المحرك المتزامن حينئذ اسم المكثف المتزامن (synchronous condenser)

عزم دوران المحرك : إذا راعينا أن الجزء $3I^2 R_a$ من القدرة الداخلة للمحرك $3 VI \cos \phi$ يبدد كمفقودات نحاسية فى ملفات المنتج ، فاننا نستطيع حساب عزم دوران المحرك الكلى (total torque) T_e من القدرة الكهربية P_e على النحو التالى :

$$P_e = 3 V I \cos \phi - 3 I^2 R_a = 3 E_o I \cos \psi \text{ watts} \quad (٤ - ٢١)$$

$$T_e = \frac{P_e}{2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81} = 0.973 \frac{P_e}{n_s} \quad \text{Kg.m.}$$

$$= P_e \text{ synchronous watts} \quad \cdots \quad (٤ - ٢٢)$$

ويكون عزم الدوران الفرملى T (Kg. m) للحمل ، الذى نحصل عليه فى النهاية ، مناظراً للقدرة الفرملية بالحصان (brake horsepower) ، وهى عبارة عن القدرة P_e ، بعد طرح مفقودات الحديد والمفقودات الميكانيكية P_c منها ، حيث :

$$P_e - P_c = 746 \text{ BHP} = T \times 2\pi \frac{n_s}{60} \times 9.81$$

$$T = 727 \text{ BHP} \quad \text{Kg. m.} \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad (٤ - ٢٣)$$

ويلاحظ أنه عند وجود مولد متزامن على قضبان لا نهائية ، فاننا نستطيع أن نخفف الحمل عليه تدريجيا (عن طريق ضبط المنظم) ، حتى يصبح بدون حمل ويصبح عائما مرة أخرى على القضبان ، وبذلك يمكن تحميل عمود الإدارة بحمل ميكانيكى ، والآلة دائرة بسرعة التزامن ، فى نفس الاتجاه ، فينعكس إتجاه التيار ويصبح ساريا من القضبان إلى الآلة ، بعد أن كان يسرى من الآلة إلى القضبان .
هذا ويمكن تغيير قيمة التيار ، وزاوية اختلافه المرحلى ، عن طريق تغيير الحمل الميكانيكى على عمود الإدارة ، وهو ما يناظر ضبط المنظم ، أو تغيير القدرة المحركة فى حالة المولد ، ثم عن طريق تغيير التنبيه ، تماما كما حدث بالنسبة المولد .

تغيير تيار المنتج فى المحرك نتيجة لتغيير التنبيه مع ثبوت قدرة المخرج :

تمثل القدرة P_e فى المعادلة (٢١ — ٤) القدرة الميكانيكية الكلية ، التى ينتجها المحرك على عمود الإدارة ، وهى تزيد عن القدرة الميكانيكية الفرملية ، التى نستفيد بها فى الحمل ، بالمفقودات الميكانيكية ومفقودات الحديد . ونظراً لأن هذه المفقودات ثابتة تقريبا ، فاننا نستطيع اعتبار أن P_e هى القدرة الميكانيكية التى نحصل عليها حتى يمكن استخدام المعادلة (٢١ — ٤) فى تحليل خصائص المحرك ، وذلك بتعديلها على النحو التالى :

$$I^2 - \frac{V}{R_a} I \cos\varphi = - \frac{P_{e1}}{R_a} \quad \left(P_{e1} = \frac{P_e}{3} = \text{القدرة المرحلية} \right)$$

وباضافة $\left(\frac{V}{2R_a}\right)^2$ إلى حدى هذه المعادلة ، نجد أن :

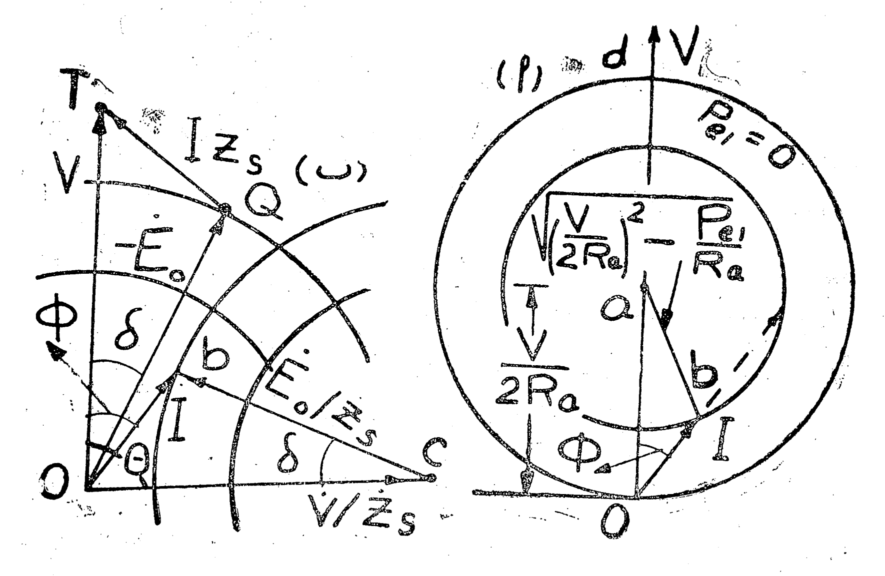
$$I^2 + \left(\frac{V}{2R_a}\right)^2 = 2\left(\frac{V}{2R_a}\right) I \cos\varphi = \left(\frac{V}{2R_a}\right)^2 - \frac{P_{e1}}{R_a} \quad \dots \dots \dots \quad (٢٤ — ٤)$$

يمثل الحـــد $\frac{V}{2 R_a}$ تيارا فى اتفاق مرحلى مع V (لأن المقسوم عليـــه مقاومة) ، وبذلك نجد أن الحد الايسر من المعادلة (٢٤ — ٤) عبارة عن مجموع مربعى تيارين ، مطروحا منه ضعف حاصل ضرب هذين التيارين فى جتا الزاوية بينهما ، مما يعنى أن هذين التيارين يكونان ضلعى مثلث يكون ضلعه الثالث هو الجذر التربيعى للحد الايمن للمعادلة (٢٤ — ٤) أى $\sqrt{\left(\frac{V}{2 R_a}\right)^2 - \frac{R_{e1}}{R_a}}$

ويمكن رسم هذا المثلث بمقياس رسم معين للتيار ، فنحصل على المثلث Oab ، كما هو مبين فى شكل (١٦ — ٤ أ) ، وذلك عند قيمة معينه للقدره P_e (الحمل الكامل)، التى يسحب عندها المحرك تيارا معينا I ، عند معامل قدرة معين $\cos \phi$ ، من القضبان اللانهائية . ويلاحظ أننا نكون بهذه الطريقة قد قمنا بحل المعادلة (٢٤ — ٤) بالرسم . وفى هذه الحالة يجب أن يكون أى من I أو ϕ معلوما مع P_e ، لكى يمكن تحديد الثانى فيها . فاذا كانت P_e ثابتة (أى أن الحمل الميكانيكى على عمود الادارة يظل ثابتا) ، فاننا نحصل على قيم مختلفة للتيار على حسب تغير قيمـة ϕ ، نتيجـة لتغيير تنبيه الآلة . وفى الحقيقة أننا نحصل على قيمتين للتيـار I ، عند كل قيمـة لزاوية الاختلاف المرحلى ϕ ، أو عند تنبيه معين للآلة ، وبالأحرى عند معـامل القدرة $\cos \phi$ ، كما يتضح من حل المعادلة (٢٤ — ٤) بالنسبة لـ I ، حيث :

$$I = \frac{V}{2 R_a} \cos \phi \mp \sqrt{\left(\frac{V}{2 R_a} \cos \phi\right)^2 - \frac{P_{e1}}{R_a}} \quad (٢٥ — ٤)$$

وبالنسبة للحل بالرسم ، المبين فى شكل (١٦ — ٤) ، نجد أن ثبوت قيمة P_e يؤدى إلى ثبوت طول المستقيم ab ، مما يعنى أن المحل الهندسى لطرف متجـــه التيار I ، عندما تتغير ϕ ، فى هذه الحالة ، على محيط دائرة مركزهـا a ، ونصف



شكل (١٦ — ٤)

قطرها ab ، الذى يمثل المقدار $\sqrt{\left(\frac{V}{2R_a}\right)^2-\frac{R_{e1}}{R_a}}$ (وهو تيار أيضا) ويكون لكل قيمة للزاوية ϕ قيمتان للتيار I ، إحداهما كبيرة (الخط المتقطع) نرفضها، والثانية أصغر منها نأخذ بها .

بمراجعة المعادلة (٢٥ — ٤) ، نجد أنه عندما تكون P_e تساوى صفرا ، مما يعنى عدم وجود حمل ميكانيكى على عمود الادارة ، وهى حالة اللاحمل، فان قيمة التيار I إما أن تساوى صفرا (وهى القيمة المعقولة التى نأخذ بها) ، وإما أن تساوى $\frac{V}{R_a}\cos\phi$ (قيمة غير معقولة ولا نأخذ بها) . فاذا كانت ϕ تساوى صفرا ، فان هذا يعنى أن نصف قطر الدائرة المناظر فى الرسم هو $\frac{V}{2R_a}$. وتكون هذه الدائرة هي المحل الهندسي لطرف متجه التيار I فى حالة اللاحمل .

هذا ، وإن وجود الاشارة السالبة قبل الحد $\frac{P_{e1}}{R_a}$ تحت الجـذر يستدعى ألا تزيد قيمة القدرة P_e عن حد معين ، حتى نحصل على قيم حقيقية للتيـار I . وهذه هى قيمة النهاية العظمى للقدرة الميكانيكية P_{emax1} ، التى يمكن أن نحصل عليها من المحرك ، وهى تتحدد بالقيمة التى تجعل المقدار $\sqrt{\left(\frac{V}{2R_a}\right)^2 - \frac{P_{e1}}{R_a}}$ يساوى صفرا ، (عندما تساوى ϕ صفرا أيضا) ، فتكون :

$$P_{emax1} = \frac{V^2}{4R_a} \quad \ldots \quad (٢٦ - ٤)$$

وتؤول الدائرة فى هذه الحالة إلى النقطة a (نصف القطر ab يساوى صفرا) وتكون قيمة التيار المناظرة (قيمة واحدة فقط) هى $\frac{V}{2R_a}$. وهذا يعنى أن قيمة قدرة المدخل تصبح $V\left(\frac{V}{2R_a}\right)$ أى $\frac{V^2}{2R_a}$ ، لكل مرحلة من مراحل المحرك . وتكون القدرة المفقودة فى ملفات المنتج عبارة عن $R_a \left(\frac{V}{2R_a}\right)^2$ أى $\frac{V^2}{4R_a}$ ، وهى نصف قيمة قدرة المدخل ، مما يعنى أن قيمة معامل الجودة أصبحت 50 % فى هذه الحالة .

نستخلص مما سبق أنه عند ثبوت قيمة القدرة P_e ، وتغيير تنبيه المحرك ، فان طرف متجه التيار I يقع على محيط دائرة تحددها القيمة P_e ، بحيث يكون لكل قيمة دائرة معينة . هذا ولا يؤثر تغيير التنبيه على قدرة المخرج الميكانيكية :

تغيير تيار المنتج فى المحرك نتيجة لتغيير قدرة المخرج مع ثبوت تنبيه الآلة :

سبق أن بينا أن المعادلة (٢٠ — ٤) التى تربط بين القوة الدافعة الكهربية E_o التي تتولد في المولد ، والضغط V على أطرافه ، والتيار I الذى يسرى منه ، تعنى

أن متجه القوة الدافعة الكهربية $\dot{E}_o$ يتكون من مركبتين، احداهما عبارة عن متجه الضغط المرحلى على أطراف المولد $\dot{V}$ ، والثانية تساوى هبوط الضغط $\dot{I}\,\dot{Z}_s$ فى كل مرحلة من مراحل المولد وتضاده فى الاتجاه . لذلك نجد أنه فى جميع مخططات المتجهات الخاصة بالمولد يجب أن نلاحظ أن رأس السهم على كل من $\dot{V}$ و $\dot{E}_o$ يشير إلى الوضع المرحلى الفعلى لها ، بينما يشير رأس السهم على المتجه $\dot{I}\,\dot{Z}_s$ فى عكس إتجاه متجه هبوط الضغط الفعلى فى المنتج ، على أساس أن ما نشير اليه هو مركبة المتجه $\dot{E}_o$ ، اللازمة لمعادلة متجه هبوط الضغط ، وهى لذلك تضاده فى الاتجاه وتساويه فى المقدار . وقد كان من الممكن كتابة المعادلة بالصورة التى تتمشى مع قانون كيرشوف، على أساس أن الضغط الطرفى $\dot{V}$ هو محصلة الضغط $\dot{E}_o$ ، مضـــافا اليه هبوط الضغط $\dot{I}\,\dot{Z}_s$ ، الذى يجمع مع $\dot{E}_o$ فى هذه الحالة باتجاهه الأصلى ، وهو عكس الاتجاه المعطى .

لكى نحصل على معادلة ، مماثلة للمعادلة (٢٠ — ٤) ، بالنسبة للمحرك ، يجب أن نراعى أن الضغط المرحلى $\dot{V}$ للقضبان ، التى يسرى منها التيار $\dot{I}$ للمحرك عند معامل قدرة معين $\cos\varphi$ ، يجب أن يحتوى على المركبة $\dot{I}\,\dot{Z}_s$ ، التى تساوى هبوط الضغط المرحلى فى المنتج وتضاده فى الاتجاه ، وكذلك على المركبة $\dot{E}_o$ —، التى تساوى القوة الدافعة الكهربية المرحلية $\dot{E}_o$ المضادة (حالة المحرك) وتضادها فى الاتجاه . ويكون التعبير عن ذلك بمعادلة مماثلة للمعادلة (٢٠ — ٤) على النحو التالى :

$$\dot{V} = -\dot{E}_o + \dot{I}\dot{Z}_s \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \qquad (٤-٢٧)$$

يبين شكل (١٦ — ٤ب) مخطط المتجهات للمحرك على أســـاس المعادلة (٢٧ — ٤)، كما تمثلها أضلاع المثلث OQT . بقسمة حدود المعادلة (٢٧ — ٤) على $\dot{Z}_s$:

$$\frac{\dot{V}}{\dot{Z}_s} = -\frac{\dot{E}_o}{\dot{Z}} + \dot{I}$$

$$\therefore \quad \dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_s} + \frac{\dot{E}_o}{\dot{Z}_s} \quad \ldots\ldots\ldots \qquad (٤-٢٨)$$

إن كل حد فى المعادلة (٢٨ — ٤) عبارة عن متجه ذى قيمة، التى هى عبارة عن قيمة الحد المناظر فى المعادلة (٢٧ — ٤) مقسومة على Z_s ، وهو متأخر عن متجه هذا الحد المناظر بالزاوية θ ، كما هو مبين فى شكل (١٦ — ٤ب)، حيث تمثل أضلاع المثلث Ocb حدود المعادلة (٢٨ — ٤) .

تتوقف قيمة الزاوية δ ، فى كل من المثلثين QQT ، Ocb ، على مقدار الحمل الميكانيكى (القدرة P_e) على المحرك . وعندما يكون تنبيه المحرك ثابتا عند قيمة معينة ، والحمل الميكانيكى متغيرا ، فان النقطة Q تتحرك على محيط دائرة يتوقف نصف قطرها على E_o ، وبالتالى على تنبيه الآلة الثابت . وفى نفس الوقت تتحرك النقطة b على محيط دائرة أيضا ، يمثل نصف قطرها القيمة $\frac{E_o}{Z_a}$ الثابتة أيضا . وتتحدد بذلك قيمة كل من I و ϕ على حسب قيمة δ ، التى يحددها الحمل الميكانيكى المتغير ، عند تنبيه معين ثابت للآلة . وبتغيير التنبيه، وتثبيته عند قيم

معينة أخرى ، نحصل على دوائر أخرى ، كما هو مبين فى شكل (١٦ — ٤ب) .

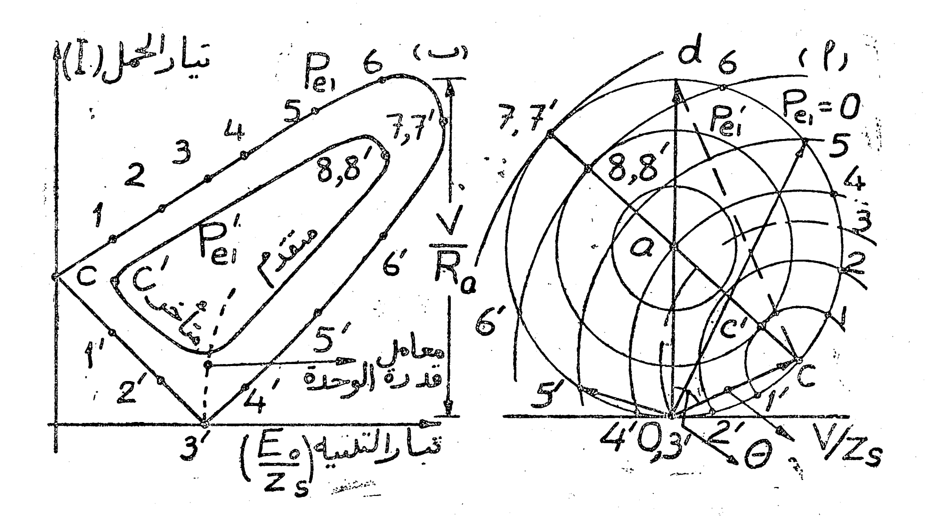
منحنيات V ومنحنيات O للمحرك المتزامن :

(The V — and O — curves)

يمكن جمع شكلى (١٦ — ٤ أ ، ب) فى مخطط واحد ، لكى نستنتج منه بعض الخواص المميزة للمحـــرك المتزامن ، ويتم ذلك بتطابق المتجهين Ob ، اللذين يمثلان نفس التيار I فى الشكلين ، معاً . وحينئـذ فسوف تقـع النقطة C على الدائرة التى تمثل $P_{e1} = O$ ، كما يتضـح من التحليل الآتى ، بالرجوع إلى شـكل (١٧ — ٤ أ) :

$$Oc = \frac{V}{Z_s} = \frac{V}{R_a} \times \frac{R_a}{Z_s} = \frac{V}{R_a} \cos \theta$$

$$= Od \cos \theta \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad (٤—٢٩)$$



شكل (١٧ — ٤)

نرسم من a دوائر القدرة الميكانيكية الثابتة ، وتكون أكبرها هى دائرة القدرة $P_{e1} = O$ أى اللاحمل ونصف قطرها ad يساوى $\frac{V}{2 R_a}$ ، كما سبق بيانه فى شكل (١٦ — ٤ أ) . ثم نرسم من C دوائر التنبيه الثابت ، وهى التى تمثل قيما مختلفة للتنبيه فى الآلة ، الذى يتناسب مع القيمة $\frac{E_o}{Z_s}$ ، كما سبق بيانه فى شكل (١٦ — ٤ب) .

تتقاطع كل دائرة من دوائر التنبيه الثابت مع دائرة القدرة الثابتة $P_{e1} = O$ ، أو عند اللاحمل ، فى نقطتين ، مما يعنى أننا إذا احتفظنا بالحمل الميكانيكى ثابتا عند هذا المستوى ، وقمنا بتغيير تنبيه المحرك ، فاننا نحصل على قيمتين مختلفتين لتيار المنتج I عند كل قيمة لتيار التنبيه أو $\frac{E_o}{Z_s}$ ، فنحصل على التيارين 01′ و 01 مع دائرة التنبيه الصغرى ، التى نصف قطرها C1 ، ونحصل على التيارين 02′ و 02 مع دائرة التنبيه التى تليها ، التى نصف قطرها C2 ، وهكذا . ويلاحظ أننا نحصل على تيار المنتج يساوى صفرا عند النقطة 3′ مع دائرة التنبيه الثالثة ، التى نصف قطرها C3 ، وتكون قيمة التيار الأخرى هى O3 . وعندما يكون التنبيه صفرا ، أى عندما تؤول دائرة التنبيه إلى النقطة C ، فاننا نحصل على قيمة واحدة للتيار هى OC . ونحصل على قيمة واحدة للتيار مرة أخرى عندما تمس دائرة التنبيه ، التى نصف قطرها 7′ و C7 ، دائرة القدرة فى النقطتين المنطبقتين 7′ و 7 .

برسم المنحنى الذى يربط بين تيار الحمل I ، وتيار التنبيه أو $\frac{E_o}{Z_s}$ ، من النتائج السابقة ، نحصل على منحنى O للمحرك عند اللاحمل ، ويكون الجزء الأسفل من هذا المنحنى بين النقطة C والنقطتين 7′ و 7 شكل (١٧ — ٤ب) ، هو منحنى V للمحرك عند اللاحمل

أيضا . ويمكن رسم منحنيات O ومنحنيات V أخرى ، عند مستويات قدرة مختلفة ، بنفس الطريقة ، كما هو مبين فى شكل (١٧ — ٤ أ ، ب) بالنسبة لمستوى القدرة P'_{e1} .

بدراسة هذه المنحنيات نلاحظ ما يأتى :

١ — نحصل على قيمة واحدة لتيار المنتج عندما يكون التنبيه فى نهايته الصغرى مع الحمل المقرر . وتتحدد هذه النهاية الصغرى للتنبيه بدائرة التنبيه الصغرى المماسة لدائرة الحمل ، مثال ذلك النقطة C' شكل (١٧ — ٤ أ ، ب) . كذلك نحصل على قيمة واحدة لتيار المنتج مرة أخرى ، عندما يكون التنبيه فى نهايته العظمى مع الحمل المقرر ، مثال ذلك النقطتان المنطبقتان 7' و 7 ، والنقطتان المنطبقتان 8' و 8 . وتتحدد هذه النهاية العظمى للتنبيه بدائرة التنبيه الكبرى المماسة لدائرة الحمل المقرر .

٢ — نحصل على أصغر قيمة لتيار المنتج ، عندما يساوى معامل القدرة الوحدة ، ويكون ذلك عند قاع منحنى V ، كما هو مبين فى شكل (١٧ — ٤ ب) حيث يربط بين نقط معامل قدرة الوحدة المتناظرة ، على منحنيات القدره المختلفة ، الخط المتقطع ، المشار اليه بمعامل قدره الوحده ، وتكون تيارات المنتج على يمين هذا الخط متقدمة على الضغط ، كما تكون تيارات المنتج على يسار الخط متأخرة عن الضغط .

٣ — نظرا لأن تيارات المنتج فى الجزء العلوى من منحنى O (عند الأحمال المختلفة) تكون كبيرة ، بالنسبة لتيارات المنتج على الجزء السفلى ، ومع نفس الحمل ، يقتصر اهتمامنا على منحنيات V فقط ، وخاصة أن المحرك يخرج عن حد

الاتزان فى الأجزاء العلوية من منحنيات O ، مما يؤدى إلى توقفه عند تشغيله فى حدود هذه الأجزاء .

مثال :

What is the maximum output of a 3—phase, mesh connected, 250 V, 20 h.p., synchronous motor when the generated electromotive force is 320 V ? The effective resistance and synchronous reactance per phase are respectively 0.3 ohm and 4.5 ohms. The friction, windage, iron and excitation losses total 800W, and are assumed to remain constant. Give values for (a) horse power (b) line current (c) power factor (d) ratio of stalling current to full-load current at this value of the excitation.

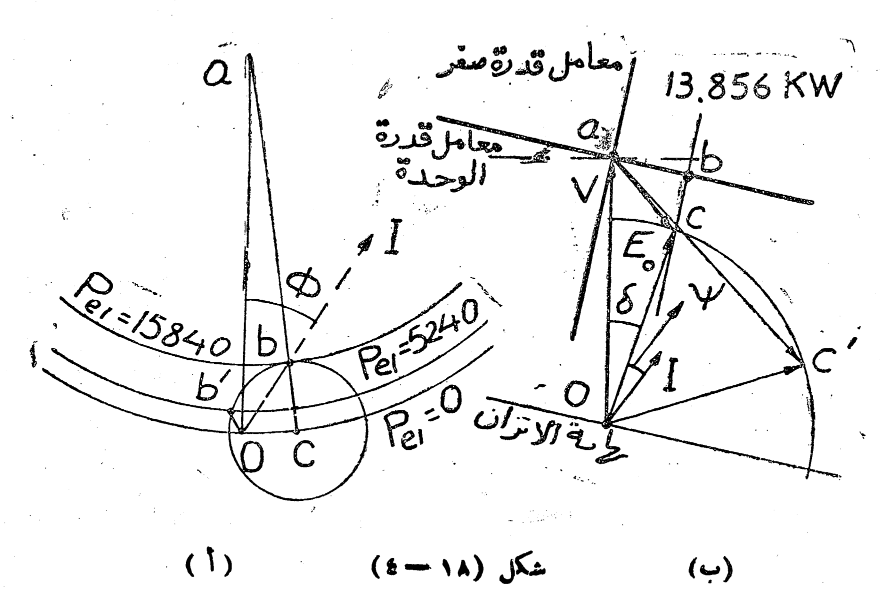
لكى نحصل على النهاية العظمى للقدرة عند تنبيه معين يجب أن تمس دائرة هذا التنبيه دائرة القدرة المطلوبة عند النقطة b ، التى تقع على خط المركز aC كما فى شكل (١٨ — ٤ أ) ، وهى تناظر ′C فى شكل (١٧ — ٤ أ) .

$$Z_s = \sqrt{(0.3)^2 + (4.5)^2} \simeq 4.51 \quad \text{ohms}$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{4.5}{0.3} = 86° \; 10'$$

$$\frac{V}{Z_s} = 55.4 \text{ A} \quad , \quad \frac{E_o}{Z_s} = 70.9 \text{ A} \quad ,$$

$$\frac{V}{2R_a} = 416 \text{ A}$$



(أ) شكل (١٨ — ٤) (ب)

نستخدم طريقة الرسم المبينة فى شكل (١٧ — ٤ أ)، ونأخذ مقياس رسم التيار كل 50 أمبير يساوى 1 سنتيمتر، فيكون طول Oa بالسنتيمترات 8,32 ويكون طول OC بالسنتيمترات 1,11 وطول نصف قطر دائر التنبيه Cb 1,42 سنتيمترا، ويمثل Ob التيار المرحلى، كما هو مبين بشكل (١٨ — ٤ أ)، حيث:

$$Ob = 1.86 \text{ cms} \quad , \quad I_{ph} = 93 \text{ A} \quad , \quad I_L = 93\sqrt{3} = 161 \text{ A}$$

$$ab = 6.9 \text{ cms} \longrightarrow 345 = \sqrt{\left(\frac{V}{2R_a}\right)^2 - \frac{P_{e1}}{R_a}}$$

$$\therefore \quad P_{e1} = 0.3\,(17.28 \times 10^4 - 11.9 \times 10^4) = 15.84 \text{ KW}$$

$$P_e = 47.52 \text{ KW} \quad , \quad \text{output} = 47.52 - 0.8 = 46.72 \text{ KW}$$

$$\text{horse power} = \frac{46.72}{0.746} = 62.5$$

$$\phi = 36^\circ \quad , \quad \cos\phi = 0.809$$

بهذا نكون قد حصلنا على قيمة التيار ، ومعامل القدرة ، ثم قيمة النهاية العظمى القدرة بالحصان (P_e) عند هذه القيمة من التنبيه ($E_o = 320$ V) . ونظراً لأن زيادة القدرة على المحرك عن هذه القيمة ، مع هذا التنبيه ، يؤدى إلى خروجه عن حدود الاتزان ، وتوقفه بعد ذلك ، فإن التيار الذى حصلنا عليه هو فى الواقع تيار التوقف (stall current) . قدرة الخرج عند الحمل الكامل 20 حصان تساوى 14920 وات ، وبإضافة 800 وات إليها نحصل على P_e عند الحمل الكامل ، ومنها نحصل على P_{e1} وهى تساوى 5240 وات فى هذه الحالة ، وهذا يحدد نصف قطر دائرة القدرة ab′ عند الحمل الكامل حيث :

$$ab' = \sqrt{(416)^2 - \frac{5240}{0.3}} = 394 \text{ A} = 7.88 \text{ cms}$$

تيار الحمل الكامل :

$$Ob' = 0.55 \text{ cm} = 27.5 \text{ A}$$

نسبة تيار التوقف إلى تيار الحمل الكامل :

$$\frac{93}{27.5} = 3.43$$

ملحوظة : يلاحظ أن الأشكال مصغرة بنسب مختلفة علاوة على مقاييس الرسم

مثال (٣) :

3. A 3 phase, 4 pole, 500 volts, 50 c/s, star connected synchronous motor has a resistance and synchronous reactance of 1 ohm and 5 ohms per phase respectively. If it takes a current of 20 Amps at 0.8 power factor lagging, when operating with a certain field current, and then the load torque ia increased until the line current becomes 60 Amps, the field current remaining unchanged, find the total torqueodevel oped, and the new power factor.

$$Z_s = \sqrt{(5)^2 + (1)^2}\ 5.1\ \text{ohms} \quad \theta = \tan^{-1} 5 = 78^\circ 42'$$

$$P_1 = \sqrt{3} \times 500 \times 20 \times 0.8 = 13\,856\ \text{KW}$$

يمكن الحصول على قدرة المخرج الكهربية P_e ، فى هذه الحالة ، بطرح $3I^2 R_a$ من P_1 ، وحل المسألة بعد ذلك باستخدام الطريقة المبينة فى شكل (١٧ — ٤ أ)، كما حدث فى المسألة السابقة . ولكن وجود قدرة المدخل الكهربية يجعلنا نفضل استخدام مخطط الحل الكهربائى ، مع توفر المعلومات اللازمة لذلك ، حيث يمكن رسم المتجهات أكثر طولا ، مما يجعلنا نحصل على نتائج أكثر دقة . وفى الواقع أن مخطط الحل الميكانيكى ، الوارد فى شكل (١٧ — ٤ أ) ، والذى استخدمناه فى حل المسألة السابقة ، يؤول إلى مخطط الحل الكهربائى ، عندما تصبح $P_1 = P_e$ أى عندما نفترض أن R_a تساوى صفرا ، مما يؤدى إلى اختفاء مفقودات النحاس فى ملفات المنتج . حينئذ يصبح مركز دوائر القدرة a فى مالانهاية ، وتؤول دوائر القدرة إلى خطوط متوازية ، هى الخطوط التى تعطى المستويات المختلفة للقدرة الفعالة فى مخطط الحل الكهربائى ، وتصبح دائرة القدرة $P_{e1} = 0$ هى خط معامل القدرة صفر ، كما يؤول الخط $ac'c$ فى شكل (١٧ — ٤ أ) ، الذى يحدد النهايات العظمى للقدرة الميكانيكية عند قيم تنبيه مختلفة ، إلى خط نهاية الاتزان ، الذى يصبح موازيا للخط Oa ، خط معامل قدرة الوحدة فى الحالتين .

مقاييس الرسم :

$$1\ \text{cm} = 50\ \text{V} = \frac{50}{5.1} = 9.8\ \text{A} = 8.5\ \text{KW}$$

$$ab = 13.856\ \text{KW} = 1.63\ \text{cms} = 16\ \text{A} = I_a$$

$$= I_a Z_s = 81.5\ \text{V} = 1.63\ \text{cms}$$

$$V = \frac{500}{\sqrt{3}} = 288.5\ V = 5.77\ ems \quad ,$$

$$n_s = 1500\ r.p.m$$

نحصل من مخطط الحمل الكهربائى فى شكل (١٨ — ٤ب) على المعلومات الآتية بالنسبة لنقطة التشغيل c ، التى تحددت بالمعلومات السابقة .

$$E_o = 225\ V \quad , \quad \psi = 18^\circ \quad , \quad \delta = 19^\circ$$

$$P_e = 3E_o\ I \cos\psi = 3 \times 225 \times 20 \times \cos 18 = 12840\ W$$

بتطبيق المعادلة (٢٢ — ٤) نحصل على عزم دوران المحرك الكلى ، حيث :

$$T_e = 0.973\ \frac{12840}{1500} = 8.34\ Kg.m$$

ملحوظة : يمكن حساب P_{e1} ثم P_e من المعادلة (١١ — ٤) على النحو التالى :

$$P_{e1} = \frac{288.5}{5.1} [\ 288.5 \cos 78^\circ\ 42' - 225 \cos (\ 78^\circ\ 42' + 19^\circ)\ ]$$

$$= 56.5\ [\ 56.5 + 27.4\ ] = 4730\ W$$

$$P_e = 3 \times 4730 = 14190\ w$$

كما نحصل من المعادلة المقربة (١١ — ٤) على النتيجة :

$$P_e = 3 \times \frac{288.5 \times 225}{5.1} \cos 19 \cong 11900\ w$$

وتعزى الفروق فى النتائج إلى مدى الدقة فى الرسم ، والتقريب .

نظرا لأن تيار التنبيه لم يتغير فى الحالة الثانية عن الحالة الأولى ، فان نقطة التشغيل الثانية c' تقع على دائرة التنبيه E_o ، التى حصلنا عليها ، وتصبح قيمة IZ

فى الوقت نفسه عبـــارة عن 306 = 5.1 × 60 فولت ، ويمثل بالطول 6.1 سنتيمترا ابتداء من a (طول /ac يساوى 6.1 سم) تكون قيمة φ فى هذه الحالة 35 درجة ، متأخر .

وتكون النتائج التى نحصل عليها كما يأتى :

$$\cos \phi = 0.8192 \text{ lagging} \quad , \quad \psi = 36^\circ \quad , \quad \delta = 70^\circ$$

$$P_e = 3 \times 225 \times 60 \times 0.809 = 32750 \quad w$$

$$T_e = 0.973 \ \frac{32750}{1500} = 21.207 \quad Kg.m.$$

خواص التشغيل للمحرك المتزامن :

نختتم هذا الباب بايراد أهم خواص التشغيل للمحرك المتزامن ، وهى تتلخص فيما يأتى :

١ — نظراً للعلاقة الخاصة القائمة بين تردد الينبوع الذى يغـذى المحـرك ، وسرعته المتزامنة ، التى يحددهـا عـدد الأقطاب الثـابت ، وهى $f = \frac{pn_s}{60}$ ، فاننا نستطيع أن نعتمد اعتمادا كليا على أن المحرك سوف يدور بسرعة ثابتة تماما، إذا ظل تردد الينبوع ثابتا لا يتغير . هذا ونستطيع الحصول على سرعات متغيرة من المحرك فى المدى الذى نستطيع تحديده لتغير تردد الينبوع .

٢ — لما كان عزم الدوران الذى يعطيه المحرك ينشأ على أساس الترابط الذى يقوم بين مجموعة الأقطاب الرئيسية على العضو الدائر ، ومجموعة الأقطاب للمجال المغناطيسى الدائر ، الذى يؤول اليه التأثير المغناطيسى للفات المنتج ، عنـــدما تكون المجموعتان دائرتين بسرعة التزامن n_a ، فان المحرك لا يمتلك عزم دوران

للبدء . معنى ذلك أنه عند توصيل أطراف العضو الثابت للمحرك إلى الينبوع ، والعضو الدائر لازال فى حالة السكون ، فانه بصرف النظر عن تيار القصر الكبير الذى يمر فى ملفات العضو الثابت للمحرك فى هذه الحالة، لاينشأ عزم دوران يمكن أن يعمل على دوران المحرك . بل لابد من دوران العضو الدائر ، بأية وسيلة ، أولا حتى يصل إلى سرعة التزامن ، وعندئذ يمكن توصيل المحرك إلى الينبوع ، مع مرور تيار التنبيه فى ملفات التنبيه على العضو الدائر ، فيحدث الترابط على الفور بين مجموعة أقطاب المجال المغناطيسى الدائر ، الذى تنشئه ملفات المنتج عند توصيلها إلى الينبوع ، ومجموعة الأقطاب الرئيسية التى تدور بسرعة التزامن ، فينتج عزم الدوران المطلوب ، المناظر للتيار والقوة الدافعة الكهربية وسرعة التزامن الموجودة فى تلك اللحظة . ولكى يحدث الترابط بين مجموعتى الأقطاب ، فقد تنشأ إزاحة سريعة ومفاجئة لاحداهما ، بما يعادل خطوة قطبية تقريبا ، لحظة توصيل أطراف ملفات المنتج مع الينبوع ، حتى يصبح كل قطبين مختلفين من أقطاب المجموعتين دائرين معاً ، بما يحقق التجاذب ، ومن ثم الترابط ، بينهما طوال فترة التشغيل .

أما عند توصيل ملفات المنتج مع الينبوع ، والأقطاب الرئيسية على العضو الدائر فى حالة السكون ، فان كل قطب من أقطاب المجال المغناطيسى الدائر يحاول جذب القطب المخالف ، من أقطاب العضو الدائر الرئيسية ، الذى يتصادف مروره أمامه ، لحظة التوصيل ، بما يعطى العضو الدائر عزم دوران فى إتجاه دوران المجال الدائر . ولكن نظراً لعزم القصور الذاتى الكبير، الذى يمتلكه العضو الدائر ، فانه قبل أن يدور، يكون القطب المماثل ، من أقطاب المجال المغناطيسى الدائر ، قد جاء أمام نفس القطب من الأقطاب الرئيسية ، لكى يتنافر معه ،

ويعطيه عزم دوران فى الإتجاه المضاد ، فيظل ثابتاً بدون حركة .

توجد عدة طرق لبدء المحركات المتزامنة ، منها الطريقة التقليدية التى تتمثل فى عملية التزامن اللازم اجراؤها عند توصيل الآلة المتزامنة مع قضبان لانهائية. وفى طريقة أخرى يدار المحرك بمحرك تأثيرى صغير ،حتى يصل به إلى سرعة التزامن تقريبا ، حيث يمكن أن يحدث الترابط بين أقطاب المجال المغناطيسى الدائر والأقطاب الرئيسية . كما توجد وسائل أخرى يستلزم شرحها أن نكون على علم بنظريات المحركات التأثيرية . لذلك سنرجىء شرح هذا الموضوع حتى نصبح ملمين بخواص تشغيل هذا النوع من المحركات .

٣ — يمكن عن طريق تغيير تيار تنبيه المحرك التحكم فى معامل القدرة فى حدود واسعة ، سواء كان متقدما أو متأخرا . وهذا بخلاف المحركات الأخرى، مثل المحرك التأثيرى ، الذى لايمكن تغيير معامل قدرته إلا باستخدام أجهزة إضافية .

مسائل على الباب الرابع

1 — Two identical delta connected alternators, mechanically coupled to one prime mover, have each an armature resistance and synchronous reactance per phase of 0.3 Ω and 4 Ω respectively, and their induced electromotive forces are in phase. The machines are connected in parallel and the field excitations are so adjusted that the armatures develop 250 V and 350 V per phase respectively. Find (a) the circulating armature current, (b) the terminal voltage (c) the electrical output of the generating machine, and (d) the power supplied

by the prime mover if the mechanical and core losses total 2 KW

2 — A 5000 K V A, 50 cycle alternator running at 1500 rev. per min in parallel with other machines, has a generated electromotive force of 10000 V. Its synchronous reactance is 20%. Find for (a) no load (b) full load at power factor 0.8 lagging, the synchronising power per unit mechanical angle of phase displacement, and calculate the synchronising torque if the mechanical displacement is 0.5°

3 — A 10000 K V A, 3 phase alternator has an equivalent short circuit reactance of 20%. Calculate the synchronizing power of the armature per mechanical degree of phase displacement when running in parallel on 10000 V, 50 cycle bus-bars at 1500 rev-per min.

4 — A 2000KVA, 3 phase, 8 pole alternator runs at 750 rev. per min in parallel with other machines on 6000 V bus bars. Find the synchronizing power per mechanical degree of displacement and the corresponding synchronizing torque. The synchronous reactance of the machine is 20%.

5 — Two alternators working in parallel supply a lighting load of 3000 KW and a motor load aggregating 5000 KW at a power factor of 0.71. One machine is loaded to 5000 KW at power factor 0.8 lagging. What is the load and power factor of the other machine ?

6 — Two altenators running in parallel supply the follo-

wing loads :

1000 KW at power factor 0.9 lagging

800 KW at power factor 0.8 lagging

500 KW at power factor unity

500 KW at power factor 0.9 leading

The load on one machine is adjusted to 1500 KW at power factor 0.95 lagging. Find the load and power factor of the other machine.

7 — Two identical 3-phase, star-connected generators operating in parallel, share equally a total load of 750 KW at 6000 V and power factor 0.8. The synchronous reactance and resistance of each machine are respectively 50 Ω and 2.5 Ω per phase. The field of the first generator is excited so that the armature current is 40 A (lagging). Find (a) the armature current of the second alternator : (b) the power factor of each machine (c) the electromotive force of each machine.

8 — An alternator of 1500 KVA capacity runs in parallel with one of 1000 KVA capacity. What load should each supply and at what power factor should each operate in order that the currents and power outputs shall be proportional to their ratings if the combined load is 2000 KW at 0.8 power factor ?

9 — Two identical 2000 KVA alternators operate in parallel. The governor of the first machine is such that the frequency drops uniformlly from 50 c/s on no load to 48 c/s on full load. The corresponding uniform speed drop of the second machine is 50 to

47.5 c/s. (a) How will the two machines share a load of 3000 KVA, and what is the corresponding frequency ? (b) What is the maximum load at unity power factor that can be delivered without overloading either machine ?

10 — Two 3 phase synchronous alternators have the same number of poles and are mechanically coupled to the same shaft. They operate in parallel on a common load. Determine, for each machine, the KW output and power factor under the following conditions : Synchronous impedance of each alternator is 0.2+j2.0 ohms per phase. Equivalent impedance of the load is 3+j4 ohms per phase. Induced e.m.f. per phase is 2000+j0 volts for machine (I) and 2200+j100 volts for machine (II).

11 — A 10000 KVA, single phase alternator has a synchronous impedance of 10 ohms and a resistance of 1 ohm, and operates in parallel with constant voltage 10000 V bus-bars. Calculate :—

(a) the maximum external load that the machine can supply before dropping out of step when the machine is excited to give an E.M.F. of 11000 V.

(b) the armature current and power factor corresponding to this maximum load.

12 — Explain, with the aid of vector diagrams, the change in the armature current of a synchronous generator which is connected to infinite bus-bars, (a) when the steam admission is changed and the excitation is kept constant ; (b) when the excitation is

varied and the output power is constant.

A 3 phase, star connected synchronous generator has an armature resistance of 1.0 ohm and a synchronous reactance of 12.5 ohms. It is connected to 11000 V infinite bus-bars to which it delivers a current of 300 amps at 0.8 power factor lagging. If the excitation is kept coustant and the steam admission is increased by 40%, find the corresponding values of the machine current and power factor. If the steam admission is kept constant at the new value and the excitation is adjusted until the E.M.F. per phase becomes 7600 V, find the new value of the current and power factor.

13 — How can the active and reactive powers, delivered by a synchronous generator to infinite bus-bars, be changed ?

A 3 phase, star connected synchronous generator has an effective resistance and synchronous reactance per phase of 0.75 ohms and 10 ohms respectively. It is connected to 6600 V, 50 c/s infinite bus-bars to which it delivers 2500 KW. When the induced line E.M.F. is adjusted to 9000 V, find the line current and power factor.

14 — A 3 phase, star connected alternator, having a synchronous reactance of 25 ohms and negligible armature resistance, delivers a current of 84 amps. at unity power factor to a 11000 volt infinite bus bars. If the steam admission be unchanged and the E.M.F. raised by 25%, determine graphically the new value of machine current and power factor.

If this higher value of excitation was kept constant and the steam supply gradually increased, at what power output would the alternator break from synchronism ? Find also the current and the power factor to which this maximum load corresponds.

15 — A 3 phase, 1500 KVA, star connected alternator is delivering its full load to a 6600 V infinite bus-bars at 0.8 power factor lagging. The armature has a synchronous reactance of 8 ohms and a resistance of 0.5 ohm. Explain, with the aid of a load diagram drawn to scale, what the station operator would do if he were asked to make the machine fulfill the following operating conditions :

(a) Supply 1600 KW to the bus-bars without changing the excitation.

(b) Adjust the power factor to unity with the same active power as in (a).

(c) Supply 2000 KW at a power factor of 0.8 leading to the bus-bars.

Find the values of the machine current and E. M. F. in each case.

What is the value of the maximum power the machine would deliver just before breaking out of synchronism in case (c) ?

16 — A 3 phase, 2000 KVA, star connected altetnator is delivering its full load to a 6600 V infinite bus-bars at 0.8 power factor lagging. The armature has a synchronous reactance of 10 ohms and a resistance of 0.66 ohm, Explain what the station operator would

do if he were asked to make the machine fulfill the following operating conditions :

(a) Supply 2000 KW to the bus-bars without changing the excitation.

(b) Adjust the power factor to unity with the same active power as in (a).

(c) Supply 2500 KW at a power factor of 0,9 leading to the bus-bars.

Find the values of the machine current and E.M.F. in each case.

17 — A 6600 volts, 3-phase, star connected, 50 C/S, 1500 RPM alternator is connected in parallel with the bus bars, and the steam supply is increased till the output equals 10000 KW. When the field current is adjusted to give a line EMF of 7700 volts, the power factor of the machine becomes 0.8 lagging. Calculate :

(a) The synchronous reactance of the machine, neglecting its resistance.

(b) The maximum external load the machine can supply before dropping out of step for the same above excitation.

(c) The armature current and the power factor corresponding to this maximum load.

18 — Describe the procedure of preparing a synchronous generator and connecting it to infinite bus-bars to take a certain share of the load at a certain power factor.

A 3 phase, star connected synchronous motor is supplied from 66 0 V infinite bus-bars and takes an input

of 1500 KW, when its induced E.M.F per phase is adjusted to 5000 V. If the motor resistance and synchronous reactance per phase are 0.4 ohm and 5 ohms respectively, find the line current and power factor.

19 — A 6600 V, star connected, 3 phase synchronous motor works at constant votage and constant frequency The effective resistance and synchronous reactance per phase are respectively 2 ohms and 20 ohms. The excitation is adjusted so that when the input is 1000KW the power factor is 0.8 leading.

(a) With above excitation remaining constant, find the power factor of the motor when the input is increased to 1400 KW.

(b) If it is desired to operate the motor at unity power factor with an input of 1500 KW, find the necessary generated E.M.F. per phase.

20 — A synchronous generator, which is synchronised and connected to 11000 V, 50 c/s infinite busbars, has to supply 3750 KW at 0.8 power factor lagging. It has a synchronous reactance of 12 ohms and an armature resistance of 1.0 ohm. Explain, with the aid of a load diagram, how the station operator would proceed to make the machine deliver the required load to the busbars and find the value of the machine E.M.F. in this case. Find the percentage change in the excitation necessary to make the machine deliver the same load at 0.8 power factor leading. For this new value of excitation, find the maximum power and the corresponding current and power factor which the machine

whould deliver to the busbars before it breaks out of synchronism.

21 — A 3 phase, star connected alternator has a synchronous reactance of 10 ohms per phase and negligible armature resistance. It delivers a load of 1200 KW at 0.8 power factor lagging to 6600 V infinite busbars. If the steam admission be unchanged and the e. m. f. raised by 20%, determine the new value of the machine current and power factor. If the new value of the excitation were kept constant and the steam supply increased gradually until the machine delivers 1800KW, find the corresponding values of the machine current and power factor. Find also the power output at which the alternator would break from synchronism for the same value of excitation.

22 — A 3 phase, star connected alternator, having a synchronous reactance of 20 ohms and 2 Ω armature resistance, delivers a current of 100 amps. at unity power factor to a 11000 volt infinite bus bars. If the steam admission be unchanged and the E. M. F. raised by 35%, determine graphically the new value of machine current and power factor.
If this higher value of excitation was kept constant and the steam supply gradually increased, at what output would the alternator break from synchronism. Find also the current and the power factor to which this maximum load corresponds.

23 — A 3 phase, star connected alternator has a synchronous reactance of 17 ohms and an armature resistance

of 1.0 ohm. It is connected to an 11000 V infinite busbare to which it delivers a full load current of 140 amps at 0.8 power factor lagging. If the steam admission is kept constant and the E. M. F. of the alternator is increased by 30%, find the new value of the machine current and power factor. If the new value of the excitation were kept constant and the steam admission is increased gradually until the machine delivers 2800 KW, find the corresponding value of the machine current and power factor. Find also the power output at which the alternator will break from synchronism.

24 — The following data relate to a 275 KW, 3 phase, 6600 V, star connected, non-salient type alternator:

Voltage on open circuit	5600	6600	7240	8100
Exciting amperes	46.5	58	67.5	96

Short circuit stator current of 35 amps was obtained with an exciting current of 15 amps. Armature resistance drop on full load is 2%.

(a) Calculate the exciting current for full load operation at a power factor of 0.8 lagging.

(b) If this exciting current is kept constant, while the alternator is operating on constant voltage and frequency bus bars, find the load power which the machine gives at unity power factor.

25 — A 3 phase, star connected alternator has a synchronous reactance of 20 ohms and an armature resistance of 1.0 ohm. It is connected to an 11000 V infinite bus bars to which it delivers a full load current of

120 amps at 0.8 power factor lagging. If the steam admission is kept constant and the E. M. F. of the alternator is increases by 25%, find the new value of the machine current and power factor. If the new value of the excitation were kept constant and the steam admission is increased gradually untill the machine delivers 2500 KW., find the correspon-ding values of the machine current and power factor. Find also the power output at which the alternator would break from synchronism.

26 — Describe the procedure of preparing a synchronous generator and connecting it to infinite bus-bars to take a certain share of the load at a certain power factor.

A 3 phase, star connected synchronous motor is supplied from 6600 V infinite bus-bars and takes an input of 1500 KW, when its induced E. M. F. per phase is adjusted to 5000 V. If the motor resistance and synchronous reactance per phase are 0.4 ohm and 5 ohms respectively, find the line current and power factor.

27 — What is the H.P output corresponding to maximum input of a 3 phase, mesh connected, 250 V, 20 H.P synchronous motor when the generated E.M.F. is 320 V ? The effective resistance and synchronous reac-tance per phase are 0.9 ohm and 4.5 ohms respectively. The friction, windage. iron and excitation losses total 800 watts and are assumed to remain constant.

If the machine is delivering full load power at the above excitation, find:—

(a) the line current.

(b) the power factor.

(c) the efficiency.

28 — A 3 phase, star connected synchronous motor, having a synchronous impedance of 0.25 + j1.25 ohms per phase is connected to an 1100 V system. The machine is excited to give an induced line E.M.F. of 1500 V. Find :—

(a) the line current and power factor when the motor is delivering a net output of 850 H.P.

(b) the maximum H.P. output.

(c) the output H.P. corresponding to maximum input.

The iron and friction losses amount to 35KW and are assumed constant.

29 – A 200 V, 3 phase mesh connected synchronous motor has a resistance and synchronous reactance of 1 and 6 ohms per phase respectively. Find (a) the maximum mechanical power in watts delivered to the shaft corresponding to an induced E.M.F. of 180V; (b) the E.M.F. to produce the same previous power at unity power factor and the value of the line current (c) the absolute maximum power delivered to the shaft and the corresponding E.M.F., Electrical input and the efficiency.

الباب الخامس

التأرجح والاتزان فى الآلات المتزامنة

(Hunting and stability of synchronous machines)

ظاهرة التأرجح (او التذبذب) :

Hunting or oscillation phenomena :

سبق أن ذكرنا أن الترابط بين مجموعة الأقطاب الرئيسية على العضو الدائر للآلة المتزامنة ، وبين مجموعة الأقطاب المزعومة للمجال المغناطيسى الدائر الناشىء عن رد فعل ملفات المنتج ، يكون عن طريق خطوط القوى للمجال المغناطيسى المحصل فى الثغرة الهوائية ، التى تخرج من قطب فى إحدى المجموعتين ، وتدخل فى القطب المخالف المترابط معه من المجموعة الأخرى ، عمودية على سطح القطاب فى الناحيتين . وعندما تكون الآلة موصلة على قضبان لانهائية تكون هذه الخطوط ذات طبيعة مرنة ، تشبه فى تكوينها خيوط من المطاط ، تربط العضو الدائر ، وهو فى حالة التزامن التى يدور عليها ، بالشبكة الكهربية ذات القدره اللانهائية . فاذا حدث ما يحاول الاخلال بهذا التزامن ، سرت من الشبكة ، أو اليها ، قدرة التزامن التى تعمل على إعادة الأمور إلى نصابها الصحيح . ومن الواضح أن قدرة التزامن هذه يمكن تواجدها أيضا عندما يكون المولد عاملا على التوازى مع مولد آخر ، كما سبق شرحه فى الباب الرابع ، ولكنها لاتظهر فى حالة عمل المولد على حمل ميت منفصل (isolated dead load) ، كأن يغذى بمفرده حملا يتكون من المصابيح ، والأفران مثلا .

تكون خطوط القوى المغناطيسية ، التى شبهناها بخيوط مرنة من المطاط ، فى حالة توصيل الآلة على قضبان لانهائية ، ممسكة من ناحية أقطاب المجال المغناطيسى الدائر ، الذى يرتبط وجوده بهذه القضبان ، بالقدرة اللانهائية للشبكة الكهربية التى تدخل فيها القضبان ، بينما يكون ممسكا بها من ناحية الأقطاب الرئيسية كل عزم القصور الذاتى للكتل الموجودة على عمود إدارة الآلة بأكملها . وتشبه المجموعة ، فى هذه الحالة ، كتلة ذات وزن معين ، وبالتالى قصور ذاتى معين ، معلقة بوساطة خيط مرن فى قائم يستطيع أن يتحمل قوى جذب وشد بأى مقدار . ويشبه وضع الكتلة ، وهى فى حالة اتزان تحت تأثير وزنها وقوة الشد المضادة ، الناشئة عن استطالة الخيط بقدر معين يتوقف على هذا الوزن ، وضع الآلة المتزامنة ، وهى تدور بالسرعة المتزامنة ، فى حالة اتزان تام ، تحت تأثير عزمى الدوران الناشئين عن قدرة المجال المغناطيسى الدائر ، والقدرة المحركة (فى حالة المولد) ، أو رد فعل الحمل (فى حالة المحرك) ، على عمود الادارة .

وكما أن الكتلة ، المعلقة من خيط مرن ، تهتز بتردد طبيعى natural) (frequency of oscillation ، عندما يحدث طارىء عابر يخل بهذا الاتزان ، ثم تعود فى النهاية إلى وضع الاتزان الأصلى (مالم تخرج عن حدوده فى خلال الاهتزاز) ، فان الآلة المتزامنة تتعرض لحالة مماثلة من الاهتزاز ، ويكون لها تردد اهتزاز طبيعى ، عند حدوث مايخل بحالة التزامن التى تدور عليها ، بحيث تعود فى النهاية إلى حالة التزامن الأصلية (مالم تخرج عن حدوده) . ومن الطبيعى أننا نفترض وجود عوامل تساعد على اخماد الذبذبات فى الحالتين . هذا ويكون الاهتزاز فى الآلة المتزامنة على شكل زيادة ونقص

متتابعين فى سرعه التزامن ، التى يجب أن تظل ثابتة . ويترتب على ذلك تغير ترددى فى زاوية الحمل δ ، وبالتالى تغير فى عزم الدوران والقدرة ، التى يعطيها المولد للقضبان ، أو عزم الدوران والقدرة ، التى يأخذها المحرك من هذه القضبان .

التردد الطبيعى للتأرجح (Natural frequency of hunting) :

عندما يطرأ ما يؤدى إلى إحداث خلل لحظى فى توازن العوامل المؤثرة على الآلة ، وهى فى حالة التزامن الثابتة ، ثم يختفى العامل المؤثر بعد إشاعة الاضطراب مباشرة ، فان الآلة تواصل الاهتزاز ، حتى يتم إخماده . وفى هذه الحالة يكون تردد الاهتزاز هو التردد الطبيعى للمجموعة ، وهو يتوقف على طبيعة تكوينها ، ولا علاقة له بالعامل الذى تسبب فى حدوث الاهتزازات . وبتطبيق ذلك على الجسم المعلق بخيط مرن ، الذى شبهنا به المجموعة ، نستطيع أن نقول إننا عندما نؤثر على الجسم بقوة لحظية ، تنقله من مكانه ، ثم تتركه ، كأن تشده قليلا إلى أسفل ، ثم تتركه ، فان الجسم يهتز بالتردد الطبيعى للمجموعة ، كما سبقت لك دراسته فى علم الميكانيكا . ولا يدخل فى حساب التردد أى شىء يتعلق بالقوة التى تسببت فى وجود الاهتزازات

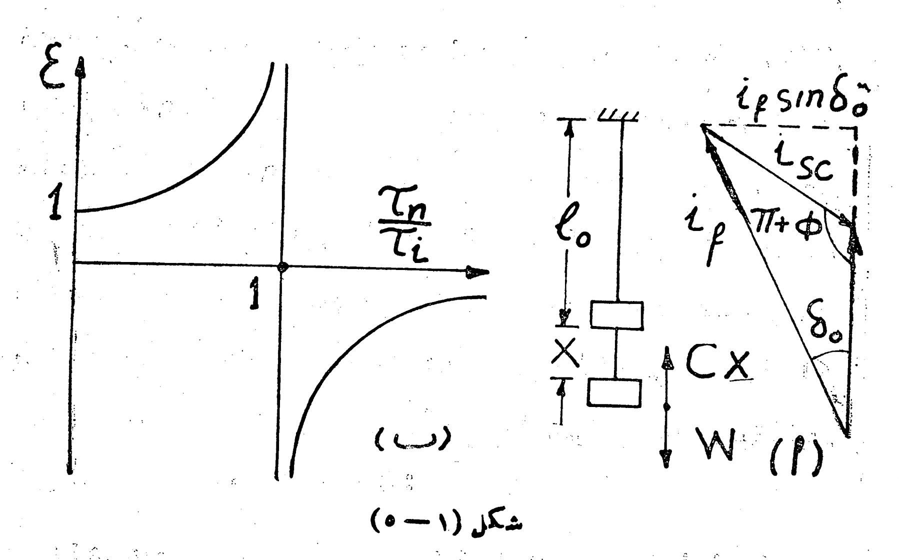
والأسباب التى تؤدى إلى حدوث اهتزازات بالتردد الطبيعى ، على هذا النحو ، كثيرة ، منها عدم دقة ضبط المنظم ، ثم تلافى الأمر فى الحال . وكذلك عمل التزامن فى وضع غير صحيح . ثم اصلاح الأمر على الفور . وكذلك التغيرات المفاجئة فى الحمل . واخفاق الاشتعال (misfire) فى احدى الأسطوانات فى آلة الاحتراق الداخلى . أو أى اضطراب لحظى فى سير الأمور ، ثم اختفاء العامل الذى أدى إلى حدوث هذا الاضطراب على الفور . هذا الاضطراب يؤدى إلى

حدوث اختلال فى التوازن بين عزم الدوران المحرك ، وعزم الدوران المضاد ، فينشأ عزم دوران معجل (accelerating torque) يزيد السرعة ، وبالتالى يزيد الزاوية δ ، أو عزم دوران مقصر (retarding torque) ينقص السرعة وبالتالى ينقص الزاوية δ . وسوف نطبق فيما يلى هذه الأفكار ، مع فرض بعض الفروض التى تسهل الحل ، لكى نحصل على قيمة تقريبية للترددالطبيعى للاهتزازات ، وأهم هذه الفروض أن الآلة توربينية ، فنهمل تأثير عزم دوران التخميد (الذى يعمل على اخماد الاهتزازات فى أقل مدة ممكنة) على معادلة الحركة ، وذلك لكى نحصل على معادلة تفاضلية سهل الحل ، يمكن بحلها الحصول على قيمة تقريبية للتردد الطبيعى للاهتزازات . فاذا فرضنا أن :

M هو عزم القصور الذاتى للكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك ، كجم . متر . ثانية^2 . T_d هو عزم الدوران المحرك ، وهو متوسط قيمة عزم الدوران الثابت للآلة المحركة ، كجم متر . T_e هو عزم الدوران المضاد الذى ينشأ من المجال المغناطيسى الدائر على أقطاب العضو الدائر (حالة المولد) ، كجم . متر .
δ_{om} زاوية الحمل بالوحدات نصف القطرية الميكانيكية (mehanical radians)
ω_{om} السرعة الزاوية عند التزامن للعضو الدائر ، بالوحدات نصف القطرية الميكانيكية فى الثانية .

هذا وسوف نفترض أيضا أن R_a أصغر كثيرا من X_s بحيث يمكن اهمال R_a واعتبار أن $\theta = \frac{\pi}{2}$ ، $Z_s = X_s$ ، كما نفترض أيضا أن $\psi \cong \varphi$. يبين شكل (١ — ٥ أ) ، على الأسس السابقة ، مخطط متجهات المولد باعتبار أن i_f هو تيار التنبيه اللازم لتوليد القوة الدافعة الكهربية E_o و i_{sc} هو تيار التنبيه اللازم لتمرير تيار الحمل الكامل عندما تكون أطراف الآلة مقصورة ، فى اختبار

دائرة القصر . ويتضح من الشكل أن $\frac{i_f \sin \delta_o}{i_{sc}} = \cos \phi \cong \cos \psi$



شكل (١ — ٥)

لكي نحصل على المعادلة التفاضلية التي تعطينـــا التردد الطبيعي للاهتزازات ، سوف نعتبر أن عزم الدوران المحرك ثابت ، ويناظر زاوية الحمل ، بالوحدات نصف القطرية الكهربية (electrical radians) δ_o . وعنـدما تكون الأحـوال طبيعية فان عزم الدوران المحرك هـذا (عزم الدوران الميكانيكى T_d فى حالة المولد) يساوى عزم الدوران المضاد (عزم الدوران الكهربائى T_{eo} الناشىء عن رد فعل المنتج) ، أى أن $T_d = T_{eo}$.

نفرض أنه بسبب أى عامل وقتى (يؤثر ثم يزول حالا) حدث الاختلال بحيث تتغير الزاوية δ_o فجأة إلى ($\delta = \delta_o + \beta$) ، وتكون β زاويه صغيرة جدا ، فى حين أن عزم الدوران المحرك T_d يظل ثابتـــا . سوف يصبح عزم الدوران المضاد الكهربائى T_e فى هذه الحالة مناظراً للزاوية الجـديدة δ ، ويؤثر الفرق بين عزمي الدوران ، المضاد والمحرك ، على مجموعة الأجزاء الدائرة فى

الآلة ، فتحدث الاهتزازات ، التى تحكمها المعادلة التفاضلية الآتية :

$$M \frac{d\omega_m}{dt} = T_d - T_e \quad \cdots\cdots \quad (٥—١)$$

حيث ω_m هى السرعة الزاوية للعضو الدائر المناظرة للزاوية الجديدة δ . هذا ويكون عزم الدوران المحرك مساويا لعزم الدوران الكهربائى المضاد قبل حدوث الاختلال ، عندما كانت الآلة تدور بسرعة التزامن ، أى عزم الدوران الكهربائى T_{eo} المناظر للزاوية δ_o . لذلك نجد أن :

$$T_d = T_{eo} = 3 E_o I \cos\psi \times \frac{1}{2\pi n_s} \cong \frac{3 E_o I \cos\phi}{\omega_o} \quad \cdots \quad (٥—٢)$$

(قدرة المخرج بالكيلو فولت أمبير)

$$P_a = \text{KVA output}$$

$$T_a = 973 \frac{P_a}{n} \quad , \quad \cos\phi \cong \frac{i_f \sin\delta_o}{i_{sc}} \quad , \quad \eta$$ معامل الجودة

بالتعويض فى المعادلة (٢—٥) بهذه القيم :

$$T_d = \frac{3 E_o I}{\omega_o} \times \frac{i_f \sin\delta_o}{i_{sc}}$$ جول

$$= \frac{973}{n_s} \frac{P_a}{\eta} \cdot \frac{i_f \sin\delta_o}{i_{sc}}$$

$$= T_a \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \sin\delta_o \text{ Kg. m.} \quad \cdots \quad \cdots \quad (٥—٣)$$

نحصل على عزم الدوران المضاد T_e ، بالتعويض بالزاوية $\delta_o + \beta$ بدلا من δ_o فى المعادلة (٣—٥) ، مع اعتبار β زاوية صغيرة ، بحيث يكون $\sin\beta \cong \beta , 1 \cong \cos\beta$ ، كما يأتى :

$$T_e = \frac{T_a}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \sin(\delta_o + \beta)$$

$$\simeq \frac{T_a}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i} [\sin \delta_o + \beta \cos \delta_o] \quad \cdots \quad (٤ - ٥)$$

بالتعويض بقيمة كل من T_d و T_e من المعادلتين (٣—٥) ، (٤—٥) فى المعادلة (١ - ٥) :

$$M \frac{d\omega_m}{dt} = - \frac{T_a}{\eta} \frac{i_f}{i_{sc}} \beta \cos \delta_o \quad \cdots \cdots \quad (٥ - ٥)$$

إن ω_m الواردة فى المعادلة (٥—٥) هى عبارة عن مجموع سرعة التزامن من الزاوية ω_{om} ومعدل تغير الزاوية δ_m (بالوحدات نصف القطرية الميكانيكية فى الثانية) حيث :

$$\delta_m = \frac{\delta}{p} = \frac{\delta_o + \beta}{p} \quad ,$$

$$\omega_m = \omega_{om} + \frac{1}{p} \frac{d\beta}{dt}$$

$$\therefore \quad \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{p} \frac{d^2\beta}{dt^2} \; (\omega_{om} \text{ constant}) \quad \cdots\cdots \quad (٦ - ٥)$$

بالتعويض من (٦ — ٥) فى (٥—٥) نجد أن :

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} + \frac{\cos \delta_o}{\eta} \cdot \frac{p T_a}{M} \cdot \frac{i_f}{i} \cdot \beta = 0 \quad \cdots \cdots \quad (٧ - ٥)$$

وهذه معادلة تفاضلية لحركة اهتزازية بسيطة ذات شكل جيبى على نمط المعادلة $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_n^2 x = 0$. وتكون قيمة السرعة الزاوية ω_n ، المناظرة للتردد الطبيعى للاهتزازات الحرة (free oscillations) ، كما جاءت فى المعادلة

(٧ — ٥) هى :

$$\omega_n^2 = \frac{pT_a}{M} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \cdot \frac{\cos\delta_o}{\eta} \quad \ldots\ldots \quad (٥ — ٨)$$

يمكننا أن نعتبر أن قيمة $\frac{\cos\delta_o}{\eta}$ تساوى واحد تقريبا ، كذلك يمكننا تعويض ما نسميه بعزم الحدافة (fly - wheel moment) ، الذى نرمز اليه بالقيمة $\frac{GD^2}{4g}$ ، وهو يكافىء M ، حيث تعطى القيمة GD^2 عادة مع بيانات تصميم الآلة ، فيكون من الأنسب إستخدامها فى المعادلات بدلا من M .

$$M = \frac{G\,D^2}{4\,g} \quad , \quad g = 9.81 \text{ m/sec}^2 \quad , \quad G \text{ Kg.} \quad , \quad D \text{ metres.}$$

$$\therefore \omega_n^2 = \frac{P_a\, p^2}{2\pi f} \cdot \frac{1000}{9.81} \cdot \frac{4 \times 9.81}{GD^2} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \quad \ldots\ldots \quad (٥ — ٩)$$

بذلك نحصل على زمن الذبذبة الحرة τ_n بالثانية (period of free oscillation)

$$\tau_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi \sqrt{\frac{2\pi\, fGD^2}{p^2\, P_a \times 4000} \cdot \frac{i_{sc}}{i_f}}$$

$$\tau_n = \frac{n_s}{241} \sqrt{\frac{GD^2}{f\,P_a} \cdot \frac{i_{sc}}{i_f}} \text{ ثانية} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٥ — ١٠)$$

تعطى المعادلة (١٠ — ٥) زمن الذبذبة الحرة لتأرجح الآلة بدلالة بيانات التصميم المتاحة عادة . ويطلق على النسبة $\frac{i_{sc}}{i_f}$ اســـــم نسبة دائرة القصر (short circuit ratio) . ولكن المعادلة بشكلها الراهن مع ذلك لا تعطى فكرة واضحة عن العوامل الحقيقية ، التى يمكن بتغييرها التأثير على قيمة زمن الذبذبة . وأهم هذه العوامل الفيض المغناطيسى فى الثغرة الهوائية الآلة ، وقد بينا

شرح العملية بأكملها على مرونة خطوط هذا الفيض ، مع تشبيهها بخيوط مرنة . لتلافى ذلك نقوم بعمل تعديل فى شكل المعادلة ، لكى يظهر فيها تأثير الفيض المغناطيسى ، كما يأتى :

سوف نبين فى باب تصميم الآلات المتزامنة ، بطريقة مماثلة لتلك التى اتبعناها فى تصميم آلات التيار المستمر (هندسة الآلات الكهربية ، صفحة ٥٠٤ المعادلة (٣—١٢)) أن $\frac{P_a}{n_s}$ ترتبط بالبعدين الرئيسيين للآلة D و l_i ، وهما اللذان نعتبرهما ثابتان على النحو التالى :

$$\frac{P_a}{n_s} = K.\ AC.\ B\, D^2\, l_i$$

$$= K \cdot \frac{IZ}{\pi D} \cdot \frac{\pi D\, l_i\, B}{\pi} \cdot D \quad (K \cong 0.185 \times 10^{-11}\, k_\omega)$$

$$= K_1 \cdot \phi_t \cdot IZ \left(K_1 = \frac{K}{\pi^2} \right) \quad \ldots\ldots \quad (٥—١٢)$$

بالتعويض من المعادلة (١١ — ٥) فى المعادلة (١٠ — ٥) نحصل على زمن الذبذبة الحرة مرة أخرى بالشكل الجديد المطلوب .

$$\tau_n = 2\pi \sqrt{\frac{2\pi}{60\,p} \cdot \frac{GD^2}{4000} \cdot \frac{1}{K_1\, \phi_t IZ} \cdot \frac{i_{sc}}{i_f}}$$

$$= \frac{0.102}{\sqrt{K}} \sqrt{\frac{GD^2}{p\, \phi_t\, I\, Z} \cdot \frac{i_{sc}}{i_f}}$$

$$= 7.54 \times 10^6 \sqrt{\frac{GD^2}{k_\omega\, p\phi_t IZ} \cdot \frac{i_{sc}}{i_f}} \quad \ldots\ldots \quad (٥—١٢)$$

يتبين لنا من المعادلة (١٢ — ٥) أن زمن الذبذبة الحرة (أو الطبيعيـــة)

يتناسب عكسياً مع كل من الحمل المغناطيسى الكلى للآلة ، أو عدد خطوط القوى المغناطيسية الكلى فى الثغرة الهوائية للآلة ϕ_t ، والحمل الكهربائى ، أو عدد الأمبير موصلات الكلى فى مجارى المنتج (صفحة ٥٣٨و٥٣٠ هندسة الآلات الكهربية) ، كما أنه يتناسب عكسيا أيضا مع تيار التنهيه i_f . وهـــذا يعطى صورة حقيقية للعوامل المؤثرة على الاهتزازات الحرة ، على هدى تمثيلها بالجسم المعلق من خيط مرن . هذا ونستطيع فى الواقع الاعتماد على التماثل الكامل بين الحالتين ، وخضوعهما لمعادلة تفاضلية نمطية ، للحصول على زمن الذبذبة الحرة بطريقة سهلة ، كما يأتى :
إذا فرضنا ، بالنسبة لحـالة الجسم المعلق فى خيط مرن أن وزنه W كجم ، وأن قوة الشد فى الخيط لكل متر استطـالة هى C كجم ، وعجـلة الجـاذبية الأرضية $g = 9.81$ متر لكل ثانية٢ ، نجد أنه فى وضع الاتزان الأصلى ، عندما تكون قيمة الاستطالة فى الخيط تساوى x متراً ، تتسـاوى W مع Cx . وعندما يطرأ أى اختلال فى حالة الاتزان ، وتحدث الاهتزازات الحرة ، تكون المعـــادلة التفاضلية التى تحكم الحركة هى :

$$\frac{W}{g}\,\frac{d^2 x}{dt^2} + Cx = 0 \quad ,$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{Cg}{W}\,x = 0$$

$$\omega_n^2 = \frac{Cg}{W} \quad , \quad \tau_n = 2\pi\sqrt{\frac{W}{Cg}} \quad \cdots \quad (١٣-٥)$$

بالنسبة للآلة المتزامنة وهى فى حالة الاتزان ، عنـدما تكون دائرة بسرعة التزامن ، يكون الاتزان ناشئا عن تعادل عزم الدوران المحرك T_d ، الذى يناظر الثقل W فى الحالة الأخرى ، مع عزم الدوران المضـاد T_e ، الذى يناظر القوة الناشئة عن استطـالة الخيط Cx . هـذا وتكون زاوية الحمل δ_m (بالوحـدات

الميكانيكية) مناظرة للاستطالة x فى الخيط المرن . فاذا اعتبرنا أن عزم الدوران المحرك يظل ثابتا عند المقدار T_e ، فان القيمة المناظرة للثابت C تكون عبارة عن عزم الدوران عند الحمل الكامل لكل وحدة من الزاوية δ_m ، أى $\frac{T_e}{\delta_m}$ (δ_m بالوحدات نصف القطرية الميكانيكية) . ويرمز للنسبة $\frac{T_e}{\delta_m}$ بالرمز T_s ، ويطلق عليها اسم عزم دوران التزامن ، حيث أن عزم الدوران T_s يشبه فى طبيعته ، فى هذه الحالة ، عزم الدوران الناشىء عن قدرة التزامن P_s ، التى سبق الحديث عنها فى الباب الرابع . ومن الواضح أن عزم القصور الذاتى بالوحدات العملية M يلعب نفس الدور الذى تلعبه الكتلة $\frac{W}{g}$ ، فنجد بالقياس على المعادلة (١٣ — ٥) ، بالنسبة للآلة المتزامنة ، أن زمن الذبذبة عبارة عن :

$$\tau_n = 2\pi \sqrt{\frac{M}{T_s}} \quad \cdots \quad \cdots \quad \text{ثانية} \quad (١٤ — ٥)$$

تكون قيمة τ_n فى حدود نصف ثانية إلى ثانية واحدة . هذا ونظراً لأن عزم القصور الذاتى للآلة الكهربية يتراوح فى قيمته بين 1 إلى 10^{12} ، فاننا نحب أن نستعيض عن عزم القصور الذاتى ، أو GD^2 فى المعادلات السابقة ، بحد يحل محلها ، ويحتوى بدلا من ذلك على مقدار ليس فيه هذا التفاوت الضخم بالنسبة للآلات المختلفة . ونستخدم فى هذه الحالة ما يسمى بثابت الزمن الميكانيكى للآلة (mechanical time-constant) ، وهو عبارة عن الزمن الذى يستغرقه عزم دوران الحمل الكامل للآلة T_d ، لكى يصل بها من حالة السكون إلى سرعة التزامن n_s ، على أن يظل ثابتا طوال فترة التعجيل . وبناء على هذا التعريف لثابت الزمن الميكانيكى θ_m نجد أن :

$$M \frac{d\omega}{dt} = T_d = \text{constant}$$ ثابت ،

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_o}{\theta_m} = \text{constant}$$ ثابت

$$\therefore \quad M \frac{\omega_o}{\theta_m} = T_d \quad , \quad \theta_m = \omega_o \frac{M}{T_d}$$ ثانية (٥—١٥)

بالتعويض فى (٥ — ١٥) عن M , ω_o و T_d بما يساويها ، نجد أن :

$$M = \frac{G D^2}{4 g} \quad , \quad \omega_o = \frac{2 \pi n_s}{60} \quad ,$$

$$T_d = \frac{973}{n_s} \cdot \frac{P_a}{\eta} \cdot \cos \phi = \frac{973}{n_s} P_i$$

$$\theta_m = \frac{GD^2}{375} \frac{n_o}{T_d} = \frac{GD^2}{36.5} \cdot \left(\frac{n_o}{100}\right)^2 \cdot \frac{1}{P_i}$$ ثانية (٥ — ١٦)

حيث تكون قدرة المدخل بالكيلووات :

$$P_i = \frac{P_a}{\eta} \cos \phi$$

فاذا اعتبرنا $\frac{\cos \phi}{\eta}$ يساوى واحد تقريبا ، نجد أن :

$$\theta_m \cong \frac{GD^2}{36.5} \cdot \left(\frac{n_o}{100}\right)^2 \cdot \frac{1}{P_a}$$ ثانية .... (٥—١٧)

بالتعويض عن P_a فى المعادلة (١٠ — ٥) بدلالة θ_m من المعادلة (١٧ — ٥):

$$\tau_n \cong 25 \sqrt{\frac{\theta_m}{f} \cdot \frac{i_{sc}}{i_f}}$$ .... ثانيه (٥—١٨)

وتتراوح قيمة θ_m فى الآلات الكهربية بين ثانية واحدة وعشر ثوانى .

مثال محلول (١) :

a 3—phase synchronous generator is rated at 1235 KW, 0.89 p.f. lagging when it is connected to 50 c/s infinite bus bars. It is driven at a speed of 125 r.p.m., and the moment of inertia of the rotating masses on the rotor is 1.17×10^4 Kg.m.sec^2. When the generator is delivering its full load there is an angle of lead 23 degrees electrical. Find The period of free oscillations at full load. Assume the ratio of exciting current at full load to that at short circuit with full load current circulating equal to 2.2.

يوجد بهذه المسألة معلومات كافية لحساب زمن الذبذبة الحرة τ_n بجميع الطرق التى سبق شرحها . نحسب أولا ما نحتاج إلى إستخدامه فى المعادلات (١٠—٥) ، (١٤—٥) ، (١٨ — ٥) على الترتيب :

$$GD^2 = 4\, g\, M = 4 \times 9.81 \times 1.17 \times 10^4$$

$$= 45.8 \times 10^4 \text{ Kg. m}^2$$

$$1 - \tau_n = \frac{125}{241} \sqrt{\frac{0.89 \times 45.8 \times 10^4}{50 \times 1235 \times 2.2}} = 0.898 \text{ secs}$$

$$T_d = \frac{973 \times 1235}{125} = 9620 \text{ K.g m.} \quad ,$$

$$p = \frac{3000}{125} = 24$$

$$\delta_m = \frac{23}{24} \times \frac{\pi}{180} = 0.01675 \text{ radians (mechanical)}$$

$$T_s = \frac{9620}{0.01675} = 5.74 \times 10^5 \text{ Kg.m./mech.rad}$$

$$2 - \tau_n = 2\pi \sqrt{\frac{1.17 \times 10^4}{5.72 \times 10^5}} = 0.897 \text{ secs}$$

$$\theta_m = \frac{45.8 \times 10^4}{375} \times \frac{125}{9620} = 15.86 \text{ secs}$$

$$3 - \tau_n \cong 2.5 \sqrt{\frac{15.86}{50 \times 2.2}} \cong 0.945$$

نشأت الزيادة فى قيمة τ_n ، فى الحالة الثالثة، للتقريب فى قيمة θ_m ، حيث استخدمنا $P_a \cos \phi$ بدلا من P_i فى المعادلة (١٦ — ٥) . فاذا اعتبرنا أن $\eta \cong 0.9$ ، نجد أن :

$$\theta_m = \frac{45.8 \times 10^4}{375} \times \frac{125 \times 0.9}{9620} = 14.26 \text{ secs.}$$

$$\tau_n = 2.5 \sqrt{\frac{14.26}{50 \times 2.2}} = 0.9 \text{ secs.}$$

الذبذبات المفروضة (او القسرية) : (Enforced oscillations)

لايكون عزم الدوران ثابتا فى آلات الاحتراق الداخلى (عندما تدير إحداها المولد) ، وكذلك فى آلات الكبس (compressors) (عندما يدير إحداها المحرك) وسوف نعتبر أن منحنى عزم الدوران يتكون فى هذه الحالة من مركبة ثابتة T_d (فى حالة المولد) ، ومركبة متغيرة على منحنى جيبى ، بسرعة زاوية ω_i ($= 2\pi f_i$) ، ذات اتساع T_i . هذا وعند وجود توافقيات عالية فى منحنى عزم الدوران بخلاف التوافقية الأساسية T_i فانها تعطى تأثيراً يمكن حسابه بنفس الطريقة ، التى سوف نتبعها مع T_i . وتكون زاوية الحمل ، التى تنتج بفعل مركبة عزم الدوران الثابتة T_d ، هى نفس الزاوية δ_o ، كما سبق

فى حالة الذبذبات الطبيعية ، ثم يجمع على ذلك التغييرات النــاشئة بفعل عزم الدوران المتردد T_i . وتكون المعادلة التفاضلية التى تعبر عن الحركة فى هذه الحالة (مع إهمال فعل التخميد هنا أيضا) ، هى :

$$T_d = \frac{T_a}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \sin \delta_o + T_i \sin \omega_i t \; \ldots\ldots \quad (٥ - ١٩)$$

سوف يتذبذب العضو الدائر حول وضع الاتزان الثابت ، الذى يتحدد بالزاوية δ_o ، بفعل عزم الدوران المتردد T_i بالتردد f_i ، ويقال إن الذبذبات مفروضة أو قسرية فى هذه الحالة . فاذا اعتبرنا أنه عند اللحظة t تكون الزاوية δ_o قد زادت إلى δ ، حيث $\delta = \delta_o + \beta$ ، يصبح عزم الدوران المضاد مناظراً للزاوية δ ، بينما تعطى المعادلة (١٩ — ٥) عزم الدوران المحرك عند هذه اللحظة وبتطبيق المعادله (١ — ٥) مرة أخرى ، نجد أن :

$$M \frac{d\omega_m}{dt} = T_d - T_e = \Big[\frac{T_a}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \cdot \sin \delta_o$$

$$+ T_i \sin \omega_i t \Big] - \frac{T_a}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \cdot \sin (\delta_o + \beta)$$

$$= \frac{T_a}{\eta} \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \left[\sin \delta_o \quad \sin (\delta_o + \beta) \right]$$

$$+ T_i \sin \omega_i t \; \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٥ - ٢٠)$$

بنفس الطريقة التى اتبعناها فى حالة الذبذبات الطبيعيــة ، ومع فرض أن β زاوية صغيرة أيضا ، نحصل على المعادلة التفاضلية للذبذبات القسرية كما يأتى :

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} + \frac{T_a p}{M} \cdot \frac{i_f}{i_c} \cdot \cos\delta_o \cdot \beta = \frac{p}{M} T_i \sin\omega_i t \cdots \quad (٥-٢١)$$

باستخدام ω_n بقيمتها السابقة تصبح المعادلة :

$$\frac{d^2\beta}{dt^2} + \omega_n{}^2\beta = \frac{p\,T_i}{M} \sin\omega_i t \cdots\cdots \quad (٥-٢٢)$$

ويكون حل حالة الدوام (steady state solution) لهذه المعادلة :

$$\beta = \beta_m \sin\omega_i t \quad , \quad \beta_m = \frac{p\,T_i}{M\omega^2{}_n} \cdot \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)^2} \quad (٥-٢٢)$$

وينتج عن تغير الزاوية δ تغيير فى القدرة ، كما سبق شرحه فى حالة الذبذبات الطبيعية ، وتكون النهاية العظمى لتغيير القدرة عندما تصبح $\beta = \beta_m$. لذلك يتعين علينا الآن أن نحدد مدى التغيير فى قيمة القدرة ΔP_e عندما تتغير β بين $+\beta_m$ ، $-\beta_m$ ، لنرى ما إذا كان يمكن السماح بحدوث هذا التغيير أولا .

باعتبار β_m صغيرة ، نجد أن :

$$\Delta P_e = P_a \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \left[\sin(\delta_o + \beta_m) - \sin\delta_o \right]$$

$$= P_a \cdot \frac{i_f}{i_{sc}} \cos\delta_o \cdot \beta_m$$

$$= P_a \cdot \frac{i_f}{i} \cdot \cos\delta_o \cdot \frac{pT_i}{M\omega^2{}_n} \cdot \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)^2}$$

$$= P_a \cdot \frac{T_i\,\eta}{T_a} \cdot \frac{1}{1-\left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)^2} \cdots\cdots\cdots \quad (٥-٢٣)$$

إذا فرضنا أن :

$$T_{dn} = \frac{T_a}{\eta} \cos \phi \quad , \quad \varepsilon = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_i}{\omega_n}\right)^2} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\tau_n}{\tau_i}\right)^2}$$

$$\therefore \quad \triangle P_e = P_a \cos \phi \cdot \frac{T_i}{T_{dn}} \cdot \varepsilon \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٥-٢٤)$$

يطلق على ε اسم معامل التكبير (amplifying factor) ، وهو يتناسب تناسبا طرديا مع النسبة $\frac{\omega_i}{\omega_n}$ (أو $\frac{\tau_n}{\tau_i}$) ، بحيث تصبح قيمته مالانهاية عندما تساوى هذه النسبة الواحد الصحيح ، أى عندما يساوى تردد الذبذبات القسرية f_i ، التى يسببها عزم الدوران المتردد T_i ، الترددالطبيعى للمجموعة f_n . وهذه هى حالة الرنين (resonance) ، حيث نحصل على أكبر قيمة ممكنة لـ β_m ، وبالتالى ΔP_e . لذلك يجب أن نتفادى حدوث هذا الرنين فى الحياة العملية على قدر الامكان . يبين شكل (١ — ٥ب) منحنى المعامل ε كدالة للنسبة $\left(\frac{\tau_n}{\tau_i}\right)$ ويجب عدم نسيان أننا أهملنا كل تأثير للتخميد فى التحليلات السابقة .

مثال محلول (٢) :

a synchronous motor, having a rated output of 450 Kw and an efficiency of 0·95, runs at 136 r.p.m. when connected to a 50 c/s supply. The power factor is 0.9, GD^2 of the motor 50 tm^2, and the ratio i_f to i_{sc} is 2. The motor drives a one cylinder, double acting compressor, which requires a power of 400 KW. The torque-time-curve of the compressor contains a first harmonic of ± 10 %, and a second harmonic of

$\pm$ 30 %. Find the first and second harmouics af the pulsating power input of the motor.

$$P_a = \frac{450}{0.9 \times 0.95} = 527 \text{ KVA}$$

$$\tau_a = \frac{136}{241} \sqrt{\frac{70000}{50 \times 527 \times 2}} = 0 \cdot 65 \text{ sec}$$

1 — first harmonic : $\tau_{i1} = \frac{60}{136} = 0.44$ sec

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{1 - \left(\frac{0.65}{0.44}\right)^2} = -0\ 85$$

$$\frac{T_{i1}}{T_{dn}} = \frac{0.1 \times 400}{450} = 0.09$$

$$\Delta P_{e1} = \pm 527 \times 0.9 \times 0.09 \times -0.85 = \mp 36.2 \text{ KW}$$

2 — second harmonic : $\tau_{i2} = \frac{60}{2 \times 136} = 0.22$ sec

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{1 - \left(\frac{0.65}{0.22}\right)} = -0.128$$

$$\frac{T_{i2}}{T_{dn}} = \frac{0.3 \times 400}{450} = 0.267$$

$$\Delta P_{e2} = \pm 527 \times 0.9 \times 0.267 \times -0.128 = \mp 16.2 \text{ KW}$$

$$\Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} = \mp 36.2 \mp 16.2 = \mp 52.4 = \mp 11\ 65\%$$

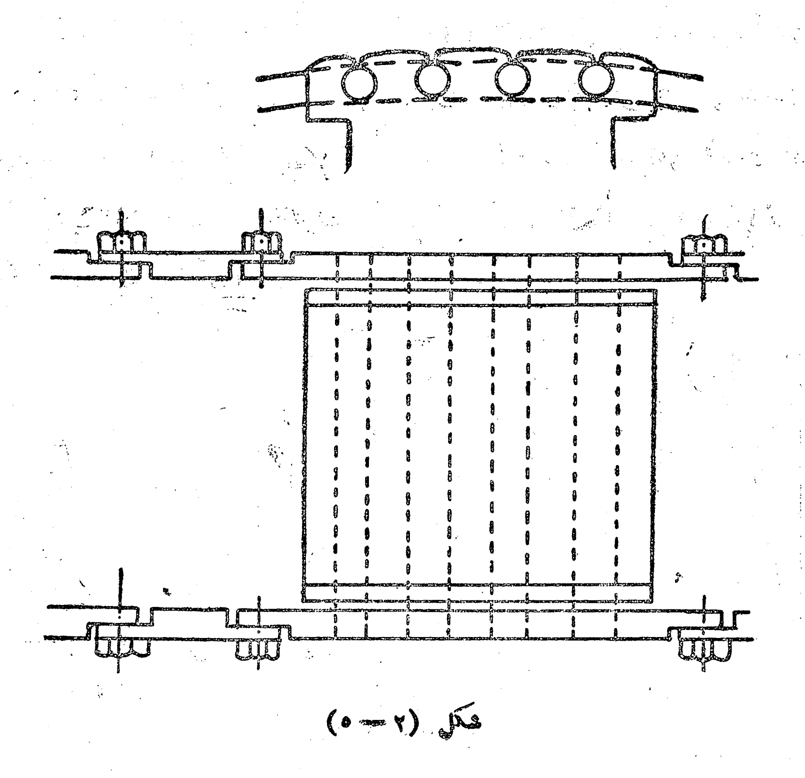
تخميد الاهتزازات واستخدام الحدافة :

(Damping of the oscillations and application of a fly-wheel)

ملفات التخميد (Damper windings) :

ينشأ عن الاهتزازات السابق دراستها حركة ترددية، زائدة (superimposed) على سرعة التزامن الثابتة لأقطاب العضو الدائر ، ذات تردد منخفض ، مما يؤدى إلى وجود حركة نسبية زائدة ، بنفس التردد ، بين وجوه الأقطاب ، وحديد المنتج ، والموصلات فى المجارى ، والمجال المغناطيسى فى الثغرة الهوائية ، فتتولد فيها جميعاً تيارات اعصارية (هندسة الآلات الكهربية ٩٣) . هذه التيارات تعمل على تبديد الجزء من طاقة الحركة الكامنة فى الكتل الدائرة ، الناشىء عن تغير سرعتها بسبب الاهتزازات ، على شكل مفقودات حرارية I^2R . وهذا يؤدى إلى تخميد هذه الاهتزازات ، وعودة الأمور إلى نصابها الصحيح ، بعد تصحيح مقدار طاقة الحركة الكامنة فى الكتل الدائرة ، إذا كانت الاهتزازات طبيعية ، أو الحد من شدة هذه الاهتزازات ، وتقليل مدى التأرجح فى القدرة ، إذا كانت الاهتزازات قسرية. وقد أمكن جعل عملية التخميد أكثر فاعلية باستخدام ملفات التخميد (Damper windings) ، وهى عبارة عن قضبان عارية من النحاس ، مدفونة فى مجارى بطول الأقطاب ، فى أحذية هذه الأقطاب ، وموصلة معاً فى كل ناحية ، من الناحيتين الأمامية والخلفية للآلة ، بحلقة من النحاس تلحم فيها جميعا ، كما هو مبين فى شكل (٢ — ٥) . وتتوقف فاعلية ملفات التخميد على مقاومة الحلقات الجانبية ، التى يجب أن تكون صغيرة إلى حد معين ، حتى تبدد أكبر كمية من طاقة الحركة غير المرغوب فيها .

ومهما كانت فاعلية التخميد ، فانه قد لا يكفى عند وجود اهتزازات قسرية ،

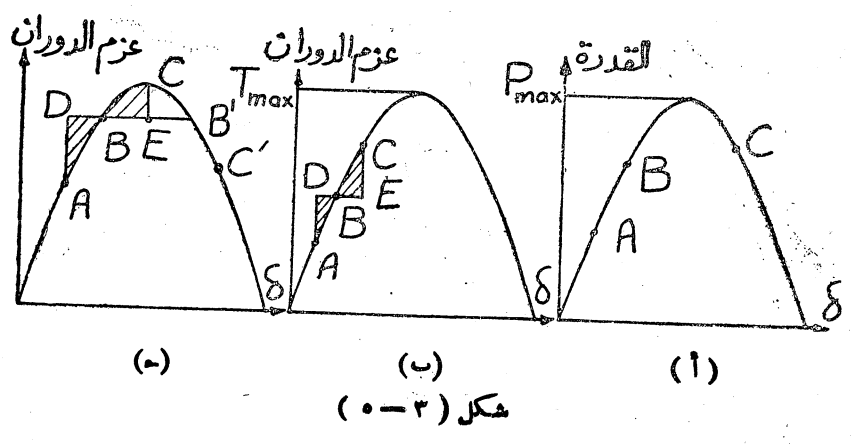


شكل (٢ — ٥)

وبخاصة عندما تكون f_i قريبة من f_n ، حيث تزيد $\triangle P_e$ زيادة كبيرة . فاذا كانت f_i أصغر قليلا من f_n ، يكون الحل بتكبير f_n ، لكى تبتعد كثيراً عن f_i بمافيه الكفاية ، وهذا لايتأتى إلا بتصغير قيمة GD^2 ، وهى حالات نادرة . أما إذا كانت f_i أكبر قليلا من f_n ، فان الحل الداعى إلى تصغير f_n ، لكى تبتعد كثيراً عن f_i ، يكون بتكبير قيمة GD^2 . وهذا أسهل تنفيذاً من الحالة السابقة ، وخصوصا بعد إتمام تصنيع الآلة ، وذلك باضافة كتل على العضو الدائر ، تتمثل فى حذافة يتوقف وزنها على مدى التصغير المطلوب فى f_n (التى تتناسب مع $\frac{1}{\tau_n}$)

اتزان الآلات المتزامنة : (stability of synchronous machines)

تبين المعادلة التقريبية للقدرة (١١ — ٤) أن القدرة التى يأخذها المحرك من القضبان ، أو يعطيها المولد لهذه القضبان تتغير ، مع زاوية الحمل δ ، على منحنى جيبى ، وذلك باعتبار تنبيه ثابت للآلة . ونظراً لأن سرعة التزامن ثابتة ، فانه يمكن رسم منحنى جيبى لعزم دوران الآلة ، على نفس النمط ، مع زاوية الحمل δ ، كما هو مبين فى شكل (٣ — ٥) .



شكل (٣ — ٥)

لكى ندرس موضوع اتزان الآلة المتزامنة نعتبر أولا حالة محرك متزامن موصل إلى قضبان لانهائية ، ونفترض أن التغيير فى القدرة وعزم الدوران يتبع المنحنيين المعطيين فى شكل (٣—٥) ، تبعا لتغيير زاوية الحمل δ . إذا أهملنا المفقودات ، فانه بعد إجراء عملية التزامن ، وتوصيل المحرك إلى القضبان يصبح عائما عليها بحيث تكون $E_o = V$ والتيار يساوى صفراً ، كما سبق شرحه . وتكون نقطة الأصل O هى نقطة التشغيل على كل من منحنى القدرة وعزم الدوران فى شكل (٣ — ٥) . إذا أخذنا فى تحميل المحرك بمنتهى البطء ، بحيث يمكن للاجهزة المختلفة أن تقوم بمهماتها فى الأزمنة المحددة لها ، وتتمكن المولدات التى تغذى

القضبان من اعطاء أجزاء الحمل المطلوبة بدون تأخير ، فان سرعة المحرك تنخفض انخفاضا وقتيا ، حتى تصل قيمة الزاوية δ إلى تلك التى تناظر عزم الدوران المطلوب من المحرك ، كما يعطيه منحنى عزم الدوران مع δ . بذلك تصبح نقطة التشغيل الجديدة هى A ، كما هو مبين فى شكل (٣ — ٥ أ) ، ويعود المحرك إلى الدوران بسرعه التزامن . ويمكن زيادة الحمل على المحرك بعد ذلك ، على نفس الوتيرة ، حتى نصل إلى نقطة تشغيل جديدة مثل B . فاذا تجاوزنا فى تحميل المحرك قيمة النهاية العظمى للقدرة P_{max} (ولعزم الدوران T_{max}) ، بحيث تناظر الزاوية δ نقطة التشغيل الجديدة C ، يصبح عزم الدوران المطلوب بذله من المحرك أكبر مما يعطيه المحرك عند نقطة C ، فيؤدى عزم دوران التقصير الناشىء فى هذه الحالة إلى وقوف المحرك عن الدوران فى نهاية الأمر ، وحدوث دائرة قصر . فتقوم قواطع الدائرة الآلية (automatic circuit — breakers) بفصل المحرك عن القضبان . وبذلك نجد أن P_{max} هى قيمة النهاية العظمى للقدرة التى يمكن للمحرك أن يعطيها عند تحميله على درجات ، وبمنتهى البطء . ويطلق على P_{max} اسم حد القدرة للاتزان الاستاتيكى (limit of static stability) ، وهى نفس القدرة التى كنا نحصل عليها من مخطط الحمل الكهربائى ، عند نهاية الاتزان ، فى الباب السابق .

لايمكن للمولدات فى الحياة العملية أن تعطى الحمل المطلوب منها ، فى نفس اللحظة مباشرة ، كما لايمكن أيضا إجراء عملية التحميل بالتدريج وبدرجة البطء المقصودين فيما سبق . وفى هذه الحالة تكون قيمة النهاية العظمى للحمل ، التى لايجب أن نتعداها ، عند إلقاء حمل مفاجىء على المحرك ، أقل بكثير من القيمة السابقة ، ويطلق عليها اسم حد الاتزان الديناميكى (limit of dynamic stability) .

وهذه القدرة تتحدد بعزم القصور الذاتى للكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك ، وبقدرة المنظم على التجاوب مع متطلبات الحمل على المولد ، وسرعة منظمات الضغط فى تصحيح الضغط ، وبالتالى على كل ما يمت بصلة إلى المؤثرات التى تحدد خواص تشغيل المجموعة بأكملها فى فترة التلاشى . وسوف نفترض فى التحليل الآتى ، من باب التسهيل ، أن المجموعة كلها مثالية ، بالنسبة للتجاوب اللحظى المباشر مع متطلبات الحمل على المحرك ، وأن المؤثر الوحيد ، الذى يسبب الفرق بين حدى الاتزان الاستاتيكى والديناميكى ، هو عزم القصور الذاتى للكتل الدائرة على عمود إدارة المحرك .

نفرض أن المحرك يدور بالحمل الذى يجعل نقطة التشغيل على منحنى عزم الدوران هى A فى شكل(٣ — ٥ب)، ثم ألقى حمل مفاجىء على المحرك ، يتطلب التشغيل عند B . يكون التجاوب الطبيعى للمحرك ، عند إلقاء الحمل المفاجىء عليه إنخفاض فى سرعته (بسبب زيادة عزم الدوران المضاد على عزم الدوران المحرك) ، لكى تصل الزاوية δ إلى قيمتها المناظرة لعزم الدوران عند B . وتنخفض سرعة المحرك فى هذه الأثناء بمعدل ثابت، فتزداد الزاوية δ بمعدل ثابت أيضا ، مما يؤدى إلى زيادة عزم الدوران المحرك تدريجيا على المنحنى من A إلى B . ويكون المحرك ، فى الفترة التى تمر بين تركه لنقطة التشغيل A ، ووصوله إلى نقطة التشغيل B ، دائراً بسرعة أقل من سرعة التزامن . فاذا أهملنا تأثيرات الاحتكاك والمفقودات على عزم الدوران، نستطيع أن نعتبر أن الهبوط فى السرعة الزاوية من ω_0 إلى ω ، الذى يكون عبارة عن $\int_{\omega_0}^{\omega} d\,\omega$ ، يساوى $\int_{T_A}^{T_B} \frac{T}{M}\,dt$ ، وهو يتناسب مع المساحة ABD $\left(\frac{d\delta}{dt} = \text{constant}\right)$ ،

وبالتالى فان طاقة الحركة المفقودة من الكتل الدائرة ، فى هذه الأثناء ، يتناسب مع نفس المساحة.

عندما تصبح الزاوية δ مناظرة لعزم الدوران عند B ، ويكون المحرك دائراً بسرعة أقل من سرعة التزامن ، تظل سرعة المحرك آخذة فى الانخفاض، والزاوية δ فى الازدياد ، وعزم الدوران المحرك أيضا فى الازدياد ، فيما وراء النقطة B، وذلك بسبب عزم القصور الذاتى للكتل الدائرة على عمود الادارة . حتى تصل إلى نقطة تشغيل معينة C . وفى خلال الفترة من B إلى C يكون عزم الدوران المحرك أكبر من عزم الدوران المضاد (عزم الدوران المضاد للحمل يساوى T_B)، فينشأ عزم دوران معجل، يعمل على وقف التناقص فى سرعة المحرك ، وزيادتها مرة أخرى . ومن ثم يبدأ ، منذ الوصول إلى نقطة التشغيل C ، توقف معدل التزايد فى الزاوية δ ، والزيادة المناظرة فى عزم الدوران المحرك ، لكى يحل محله معدل تناقص فى هذه الزاوية ، وانخفاض مناظر فى عزم الدوران ، تمهيداً للعودة بنقطة التشغيل إلى B ، ثم بسبب عزم القصور الذاتى للكتل الدائرة إلى A مرة أخرى. عند C يكون المحرك قد وصل إلى سرعة التزامن، وتكون طاقة الحركة ، التى أضيفت إلى الكتل الدائرة من B إلى C ، تساوى تلك التى فقدتها من A إلى B . وهذا شرط أساسى لكى يعود المحرك إلى الدوران بسرعة التزامن عند C ، ثم يتأرجح حول هذه السرعة ، حتى يتم تخميد الاهتزازات بوسائل التخميد المختلفة ، كما سبق شرحه عند الكلام عن الاهتزازات الطبيعية . ويتوفر هذا الشرط عندما تتساوى المساحتان ABD و BEC على منحنى عزم الدوران ، كما هو مبين فى شكل (۳ ـ ٥ب) ، عندما تقع النقطة C على الجزء الصاعد من المنحنى ، قبل الوصول إلى قمته . وفى هذه الحالة يكون تشغيل المحرك متزنا (stable opration) ، تحت

تأثير التحميل المفاجيء من A إلى B .

أما إذا استدعى الأمر ، لكى يتم التساوى بين المساحتين المذكورتين ، أن تكون النقطة C واقعة على الجزء النازل من منحنى عزم الدوران بعد الوصول إلى قمته ، كما هو مبين فى شكل (٣ — ٥ حـ) ، فان هذا يعنى أنه فى الفترة ، التى تمضى بين الوصول من القمة F إلى نقطة التشغيل C ، يأخذ عزم الدوران المحرك فى التناقص ، مما يؤدى إلى وقف معدل الزيادة فى السرعة ، قبل أن تصل إلى سرعة التزامن (عند C كما هو مفروض أصلا) ، وذلك إبتداء من المرور على النقطة F . وتبعا لخواص منحنى التشغيل النازل للمحرك فى هذه المنطقة ، فان تناقص السرعة ، وزيادة الزاوية δ بالتالى ، يؤدى إلى تناقص عزم الدوران المحرك ، وزيادة عزم دوران التقصير ، الذى يساعد على خفض سرعة المحرك . فاذا جاءت النقطة C فوق النقطة ′B التى تقع فى مستوى النقطة B شكل (٣ — ٥ب) ، فان هذا يعنى أن عزم دوران المحرك لن يقل فى هذه الفترة عن عزم دوران الحمل ، ويكون تشغيل المحرك متزنا فى هذه الحالة مثل الحالة السابقة . أما إذا جاءت النقطة C تحت النقطة ′B ، فان هذا يعنى أنه فى خلال تحقيق شرط تساوى المساحتين ، لكى تكتسب الكتل الدائرة ما فقدته من طاقة الحركة فى خلال فترة التقصير ، سوف يهبط مستوى عزم الدوران المحرك عن مستوى عزم دوران الحمل مرة أخرى ، وذلك قبل أن يعود المحرك إلى سرعة التزامن . ونظرا لوجود المحرك فى منطقة المنحنى النازل ، فى هذه الأثناء ، فسوف يتوالى النقص فى عزم دوران المحرك ، بناء على نقص السرعة ، ويزداد عزم دوران التقصير ، بناء على نقص عزم الدوران المحرك ، مما يزيد فى نقص السرعة ، حتى يتوقف المحرك عن الدوران تماما ، وتحدث دائرة القصر .

يتضح مما سبق أننا إذا أردنا معرفة مدى نصيب تشغيل المحرك من الاتزان، عندما يراد انتقال نقطة التشغيل من A إلى B ، نتيجة لإزدياد عزم دوران الحمل المضاد فجأة من T_A إلى T_B ، نرسم الخط الأفقى DBB′ ، كما هو مبين فى شكل (٣ ـ ٥ ح) ، فاذا كانت المساحة ABD أقل من المساحة التى يحصرها جزء المنحنى فوق BB′ ، فان هذا يعنى أن C سوف تقع فوق B′ ، ويكون التشغيل متزنا . أما إذا كانت المساحة ABD أكبر من المساحة التى يحصرها جزء المنحنى فوق BB′ ، فان هذا يعنى أن C سوف تقع تحت B′ ، ويكون التشغيل غير متزن .

أما بالنسبة للمولد المتزامن ، ومدى تجاوبه مع الأحمال المفاجئة ، المطلوب منه تزويد القضبان اللانهائية بها ، مع غيره من المولدات ، فان مشاكل اتزانه ترتبط ارتباطا وثيقا بمدى قدرة المنظم فى الآلة المحركة ، سواء كانت حرارية أو هيدروليكية ، على التجاوب المطلوب ، بضبط مقدار الوقود أو سريان الماء ، بالسرعة المناسبة . كما ترتبط أيضا بقدرة منظمات الضغط والتنبيه ، التى تعمل آليا بما يساعد على حفظ الاتزان ، على آداء مهمتها بالسرعة والدقة المطلوبتين فى مثل هذه الأحوال . وإذا بحثنا الأمر من نواحيه المختلفة ، نجد أن سرعة تجاوب المولد مع تغيير مفاجىء فى الحمل ، تتوقف على سلسلة من العمليات ، التى تخضع كل منها لعوامل التأخير ، الناشئة عن فعل القصور الذاتى ، بالنسبة للحركة الميكانيكية للأجزاء الدائرة ، وعن تأثير ثابت الزمن ، بالنسبة للدوائر الكهربائية والمغناطيسية فى الآلة . فاذا أخذنا فى حسابنا أيضا تأثيرات دوائر الحمل ، وخطوط النقل الكهربائية ، التى تغذيها القضبان بالحمل ، أصبح الموضوع غاية فى التعقيد . وهو يخرج فى الواقع عن مجال الدراسة فى هذا الكتاب ، لأن دراسته تتعلق حينئذ بدراسة خطوط النقل الكهربائية ، التى تؤثر ثوابتها ، والأحمال التى تنقلها ،

تأثيراً مباشراً على اتزان الشبكة الكهربية كوحدة ، بما فى ذلك الآلة المتزامنة ، ومتطلبات اتزانها . ولكننا قبل أن نترك هذا الموضع نشير إلى أمرين هامين ، بالنسبة لإتزان المولد المتزامن ، فى هذا المجال :

١ — يجب أن نلاحظ أن تغيير تيار الحمل ينعكس تأثيره على تيار التنبيه ، من ناحية أن هذا التغيير يشتمل على تغيير فى مركبة التيار ، التى تعطى التأثير المغناطيسى المضاد أو المباشر فى رد فعل المنتج . فاذا رفع حمل ذو معامل قدرة منخفض متأخر ، فان قيمة الفيض المغناطيسى فى الثغرة الهوائية تميل نحو الزيادة . ويتأخر ظهور هذه الزيادة بفعل التيارات الاعصارية ، التى تظهر نتيجة لهذا التغيير فى قيمة الفيض ، فى الأجزاء الحديدية الصماء (solid iron parts) للآلة ، وفى ملفات المجال . كما يتأخر ظهور الزيادة فى الفيض المغناطيسى أيضا بسبب معامل الحث الذاتى لملفات المجال ، وتعمل هذه الزيادة البطيئة على توليد قوة دافعة كهربية مضادة بالتأثير فى ملفات المجال ، مما يؤدى إلى خفض قيمة تيار التنبيه ، فى هذه الأثناء ، حتى ولو ظل ضغط التنبيه ثابتا . وهذا يعنى أن التأثير الناشىء عن التأخير فى تجاوب دائرة التنبيه (نتيجة لثابت الزمن فى هذه الدائرة ، وثابت الزمن فى الدائرة المغناطيسية) بتقليل تيار التنبيه ، لمواجهة إنخفاض تأثير رد فعل المنتج المضاد ، سوف يعوض ، إلى حد ما ، بما يجرى من ردود الفعل السابق شرحها . وتبلغ قيمة ثابت الزمن للمولد التوربينى ، فى مثل هذه الأحوال حوالى 5 أو 6 ثوانى ، وهى تختلف باختلاف مقدار الحمل .

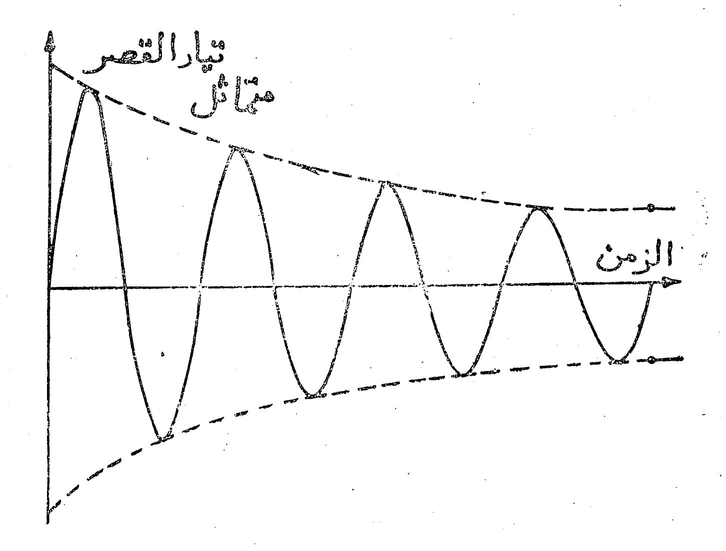
٢ — يكون الموضوع أكثر تعقيداً مع مجموعات التوربينات المائية ، نظرا لإنخفاض قيمة GD^2 للمولد ، فى هذه الحالة ، كثيراً عن قيمها للأجزاء الباقية فى المجموعة ، مما يجعل السرعة عرضة لتغييرات سريعة ، عندما يحدث تغيير كبير فى

الحمل . وإلى جانب ذلك فان عامل القصور الذاتى بالنسبة للماء يكون أكثر تأثيراً منه فى حالة البخار ، بحيث يحتاج الأمر إلى وقت أطول كثيراً ، فى حالة الماء ، لضبط المنظم على الوضع الذى يتلاءم مع الحمل الجديد . لذلك نتوقع ، عند رفع الحمل عن المولدات التى تديرها التوربينات المائية ، أن تزداد السرعة إلى حوالى 200% من سرعة التزامن ، قبل أن يتمكن المنظم من ضبط سريان المـــاء فى التوربينات بما يناظر الوضع الجديد . لذلك نحتاج فى هذه الحـالة إلى تجـاوب سريع ، من دائرة تيار التنبيه ، لخفض الضغط ، حتى لايصل إلى قيمة تصبح خطيرة بالنسبة للمواد العازلة على الموصلات .

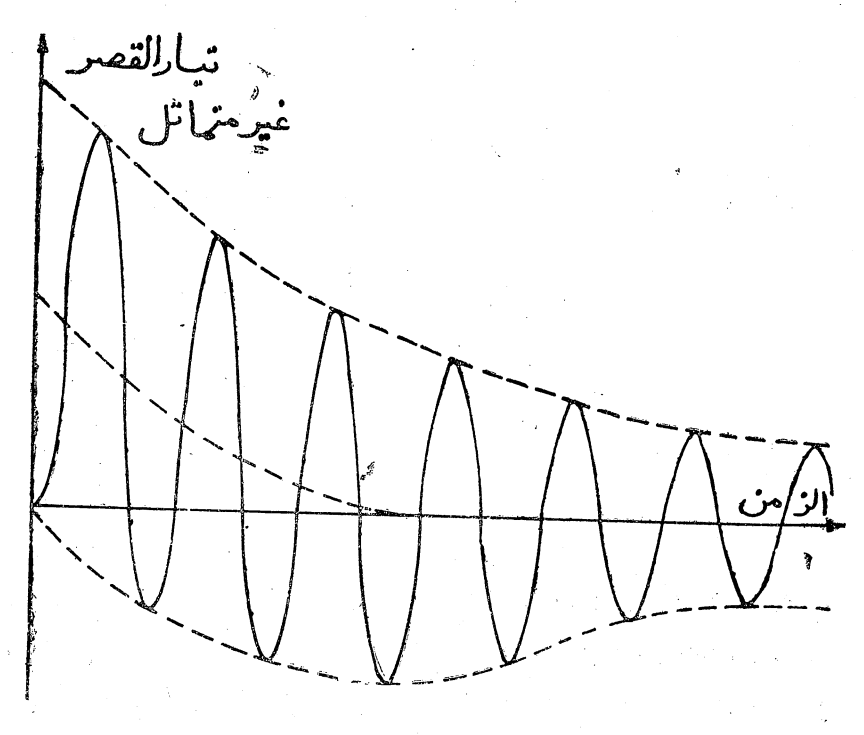
٣ — تتوقف قيمة القدرة وعزم الدوران ، عند أية لحظة أثناء التشغيل ، على قيم V ، E_o ، δ ، X_s . وقد رأينا أن δ ، E_o (ويمكن V فى بعض الحالات) تحتاج إلى فترة معينة حتى تستقر على القيم الجديدة ، إذا ما حـــدث أى تغيير مفاجىء فى الحمل ، وأن الآلة عرضة لأن تخرج عن حد الاتزان فى هذه الفترة ، حتى لو لم تخرج قيمة الحمل المطلوب عن حد الإتزان الإستاتيكى . وتكون هذه الفترة فى الواقع عبارة عن فترة تلاشى (Transient period) ، تنتقل الآلة فى أثنائها من حالة دوام (steady state) إلى حالة دوام أخرى مناظرة للحمل الجديد . ويجب أن نراعى أن X_s تتعرض هى الأخرى إلى تغييـرات جوهرية فى أثنـاء فترة التلاشى هذه ، كما أن قيمتها قد تختلف كثيرا فى حالتى الدوام ، بسبب اختلاف درجة التشبع فى الحالتين . هذا ويكون الاختلاف فى X_s واضحا ومحدداً فى حالة دائرة القصر على الآلة ، حيث تتـدرج بين ثلاث قيم متعـارف عليها عـلى النحو التالى . فى البداية ، وقبل أن يظهر تأثير رد فعل المنتج ، بسبب ثابت الزمن لكل من الدائرة الكهربية والدائرة المغناطيسية ، تكون ممانعة التلاشى (transient)

(reactance هى الفعالة ، وهى أقل من ممانعة التزامن العادية كثيرا ، وتساوى فى قيمتها ممانعة التسرب فى العضو الثابت والعضو الدائر . ونظراً لأن ملفات التخميد تكون أقرب إلى العضو الثابت من العضو الدائر ، عند وجود هذه الملفات ، وبفعل الأجزاء الحديدية الصماء القريبة من العضو الثابت ، فى الآلات التى لاتحتوى على هذا النوع من الملفات ، يظهر أولا فعل ممانعة تحت التلاشى (subtransient reactance) ، التى تساوى فى قيمتها ممانعة التسرب فى العضو الثابت ، وحول ملفات التخميد أو الأجزاء الحديدية الصماء ، ولكن ترتفع قيمتها بسرعة إلى ممانعة التلاشى ، حين يجد الفيض المغناطيسى طريقه إلى مسالك التسرب فى العضو الدائر . لذلك فان تيار القصر يبدأ بقيمة عالية جداً ، تكون محددة بممانعة تحت التلاشى ، ولكنه لا يستمر أكثر من دورة أو دورتين بهذه القيمة ، حتى يصبح محددا بممانعة التلاشى ، التى تزداد قيمتها تدريجيا ، مع تدرج ظهور رد فعل المنتج ، حتى تستقر فى النهاية على قيمة ممانعة التزامن ، المناظرة لتيار القصر الدائم ، الذى رمزنا اليه بالرمز I_{sc} .

فاذا رمزنا لممانعة تحت التلاشى بالرمز X'' ، ورمزنا لممانعة التلاشى بالرمز X' ، فان اتساع تيار القصر يتدرج فى القيمة من $\frac{V}{X''}$ إلى $\frac{V}{X'}$ ، حتى يستقر فى النهاية على القيمة $\frac{V}{X_s}$ (مع اهمال تأثير مقاومة ملفات المنتج) ، كما هو مبين فى شكل (٤ — ٥ أ ، ب) . شكل أ للحالة التى تحدث فيها دائرة القصر عندما يكون الضغط مارا بقيمة الصفر (أسوأ الأحوال) ، وشكل ب للحالة التى تحدث فيها دائرة القصر عندما يكون الضغط مارا بقيمة النهاية العظمى له . فى الحالة الأولى نحصل على تيار قصر غير متماثل (assymmetrical short circuit current) ،



شكل (٤ — ٥ أ)



شكل (٤ — ٥ ب)

وفى الحالة الثانية نحصل على تيار قصر متماثل (symmetrical short circuit current).
هذا وبينما تبلغ قيمة تيار القصر المتماثل حوالى عشرة أمثال تيار القصر العادى فى
مرحلة تحت التلاشى ، فان هذه القيمة قد ترتفع إلى حوالى عشرين مثل فى حالة
تيار القصر غير المتماثل ، وذلك بسبب احتوائه على مركبة تلاشى تعرف باسم
مركبة التيار المستمر (direct current component) . وفى حالة المولدات
التوربينية نجد أنه عندما تكون X_s حوالى 175% ، فان X' تبلغ حوالى 20%
إلى 30 % ، وتبلغ X'' حوالى 12 % إلى 20 % . وكما أنه يمكن تقسيم X_s
إلى X_{sd}[1] ، ممانعة التزامن فى المحور المباشر للآلة (Direct axis synchronous
reactance) ، X_{sc} ممانعة التزامن فى المحور المتعامد للآلة (quadrature axis
synchronous reactance) ، فانه يمكن تقسيم X' إلى X_d' , X_c' و X'' إلى
X''_d , X''_c .

مسائل على الباب الخامس

1 — Calculate the natural period of oscillation of a 2000 KVA, 3-phase alternator having a short circuit reactance of 30%, running at 750 r.p.m. on 2000 V, 25 c/s bus-bars. The moment of inertia of the complete rotating system is 200000 lb.-ft2.

2 — A 6000 KVA, 5000 V, 50 c/s, 3-phase alternator with 4 poles and a short circuit reactance of 25%.

---

(١) X_{sd} هى الممانعة المكافئة ، التى تأخذ فى الحساب تأثير رد فعل المنتج المباشر ، و X_{sc} هى الممانعة المكافئة ، التى تأخذ فى الحساب تأثير رد فعل المنتج المتعامد . ونظرا لأن المعاوقة المغناطيسية لمسار خطوط القوى فى المحور المتعامد تكون أكبر كثيرا منها فى المحور المباشر فان قيمة X_{sd} تكون أكبر من قيمة X_{sc} .

operates on constant voltage and constant frequency bus-bars. The moment of inertia of the whole rotating system is 400000 lb.-ft^2. Calculate the time of one complete oscillation.

3 — Calculate the natural period of oscillation of a 50 c/s, 10000 KVA, 6600 V, alternator driven at 1500 r.p.m. and connected to infinite bus-bars. The steady short circuit current is five times the normal full load value, and the moment of inertia of the rotating mass is 400000 lb-ft^2.

4 — An alternator driven by a slow-speed prime mover having a cyclic irregularity of frequency of 1.66 per sec, is working in parallel with other machines. The natural period of oscillation of the alternator on infinite bus-bars is 1 sec. Calculate the ratio by which the amplitude of oscillation is increased by the synchronising effects of parallel running.

الباب السادس

تصميم الآلات المتزامنة

Design of synchronous Machines

الابعاد الرئيسية او الموجهة :

(Main or leading dimensions)

يرتبط البعدان الرئيسيان أو الموجهان للآلة D , l_i ، بكل من الحمل النوعى الكهربائى AC والحمل النوعى المغناطيسى B_a، بعلاقة شبيهة بتلك التى حصلنا عليها فى حالة التيار المستمر[1] (هندسة الآلات الكهربية صفحة ٥٤٠ ، المعادلة ٢ — ١٢) . فاذا كانت KVA_i هى مقنن قدرة المنتج بالكيلوفولت أمبير ، نجد أن :

$$KVA_i = 3EI \times 10^{-3} = 3 \times 4.44\ \phi \frac{pn_s}{60} T_{ph} k_\omega I \times 10^{-11}$$

$$= 3 \times 4.44 \times \frac{\pi D}{2p} l_i B_a \times \frac{pn_s}{60}$$

$$\times \frac{\pi DAC}{6I} k_\omega I \times 10^{-11}$$

$$= 0.183 B_a A C \times 10^{-11} \times k_\omega D^2 l_i = C_o D^2 l_i n_s \quad (٦—١)$$

$$C_o = 0.183 B_a AC \times 10^{-11} \times k_\omega$$

---

(١) سوف نعتمد كثيراً على منهاج التصميم لآلات التيار المستمر ، فلذلك يستحسن مراجعة الباب الثاني عشر من هندسة الآلات الكهربية قبل دراسة هذا الباب .

C_o هو ثابت الخرج للآلة ، و D قطر المنتج و l_i طوله المثالى بالسنتيمترات.

ويمكن إعادة نفس الكلام ، الذى رددناه فى حالة آلات التيار المستمر ، عن مدى تأثر D , l_i بكل من B , AC الملائمة للحالات المختلفة ، فيمكن الاعتماد فى ذلك على ما يأتى : تكون كثافة الخطوط المغناطيسية فى الثغرة الهوائية للآلة أقل قليلا من نظيرتها فى آلات التيار المستمر ؛ لكى نحصل على كثافة خطوط فى السنة أقل أيضا من تلك التى نحصل عليها فى آلات التيار المستمر ، حتى لا تزداد المفقودات الحديدية فى الأسنان ، لأن التردد هنا ثابت عند أعلى قيمة يمكن السماح بها فى آلات التيار المستمر ، وهى 50 ذبذبة فى الثانية . وتتراوح قيمة كثافة الخطوط B_a، التى يمكن استخدامها فى الآلات المتزامنة ، بين 5000 خط/سم٢ فى الآلات ذات الخطوة القطبية القصيرة ، والتى يكون عدد الأقطاب فيها حوالى أربعة ، وبين 7000 خط/سم٢ فى الآلات ذات الخطوة القطبية الطويلة ، والتى يبلغ عدد الأقطاب فيها 16 أو أكثر . ويمكن التجاوز قليلا عن هذه الأرقام فى حالات خاصة . أما بالنسبة لـ AC فان قيمتها تتراوح بين 200 ، 500 على حسب قدرة الآلة وعدد أقطابها . وعلى العموم فان إختيار القيم المناسبة لكل من B_a , AC يتوقف أساسا على الخبرة المكتسبة من خلال صناعة الآلات الكهربية فى سنوات طويلة ، ويستحسن الإعتماد على الأرقام التى تسمح مصانع الآلات الكهربية بنشرها فى هذا المضمار .

نحتاج إلى تحديد النسبة $\lambda = \frac{l_i}{\tau_p}$ ، كما فعلنا فى آلات التيار المستمر لفصل D عن l_i فى المعادلة (١ — ٦) ، ويكون ذلك على النحو الآتى :

$$l_i = \lambda \tau_p = \lambda \frac{\pi D}{2p} \quad \dots\dots\dots \quad (٦—٢)$$

بالتعويض فى المعادلة (١ — ٦) ينتج أن :

$$KVA = C_o \frac{\lambda \pi}{2p} D^3 n_s \quad , \quad D = \sqrt[3]{\frac{2p}{\lambda \pi} \frac{KVA_i}{C_o n_s}} \quad \ldots \quad (٣—٦)$$

وبالتعويض فى (٢ — ٦) من (٣ — ٦) نحصل على قيمة l_i . هذا ويمكن تحديد قيمة λ ، على أساس عدد الأقطاب ، فى الآلات المتزامنة ذات الأقطاب البارزة ، من الجدول الآتى :

p	2	4	6	8	10	12	16	20	24	30
λ	0.75	1	1.25	1.45	1.6	1.75	2	2.25	2.45	2.75

أما بالنسبة للآلات التوربينية (p = 1) فتحدد قيمة λ ، على أساس قدرة الآلة N_s بالكيلووات ، من الجدول الآتى :

N_s	2	4	6	8	12	16	24	32	× 10^3
λ	0.8	0.9	1.08	1.18	1.3	1.5	1.75	1.85	

هذا ويمكن عموما استخدام العلاقة الآتية لتحديد قيمة λ :

$$\lambda = 0.5 \sqrt{p} \quad \ldots\ldots \ldots\ldots \quad (٤—٦)$$

يمكن استخدام المعادلة التجريبية (emperical formula) الآتية للحصول على قطر الآلة :

$$D = 12 + 1.3 \sqrt[3]{\frac{85 \; KVA \times 10^3 \; p}{n_s \; \lambda}} \ldots \quad (٥—٦)$$

هذا وتوجد معادلة أخرى تجريبية تعتمد فى استنباطها على المعادلة (٥ —

٦) ، وهى تعطى قيمة الخطوة القطبية τ_p الآلة مباشرة ، وتكون نتائجها أكثر دقة من المعادلة السابقة ، وهذه هى :

$$\tau_p = a + b \sqrt[3]{\frac{N_{si}}{f\lambda p}} \ \text{cms} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٥-٦أ)$$

حيث a و b ثابتان يمكن تحديد كل منها على أساس عدد أزواج الأقطاب فى الآلة من الجدول الآتى :

	الآلات ذات الأقطاب البارزة				الآلات التوربينية
p	2	3	4	$\geqq 10$	1
a	11.2	7.48	5.6	3.75	35
b	2.025				1.65

$$N_{sN} = 3VI = KVA \times 10^3$$

$$N_{si} = 3EI = N_{sN} \ (1 + \varepsilon \sin \phi)$$

$$\varepsilon = \frac{IX_1}{V} \cong 0.05 \longrightarrow 0.15 \quad \ldots \quad (٥-٦ب)$$

على أن تستخدم قيم λ المناسبة من الجداول المعطاة سابقا .

ويجب مراجعة قيمة السرعة المحيطية للآلة بعد تحديد قطرها D . ويلاحظ أنه باعتبار أن التردد f يساوى 50 ذبذبة فى الثانية ، تصبح قيمة السرعة المحيطية بالمتر فى الثانية مساوية عدديا لطول الخطوة القطبية τ_p بالسنتيمترات ، حيث :

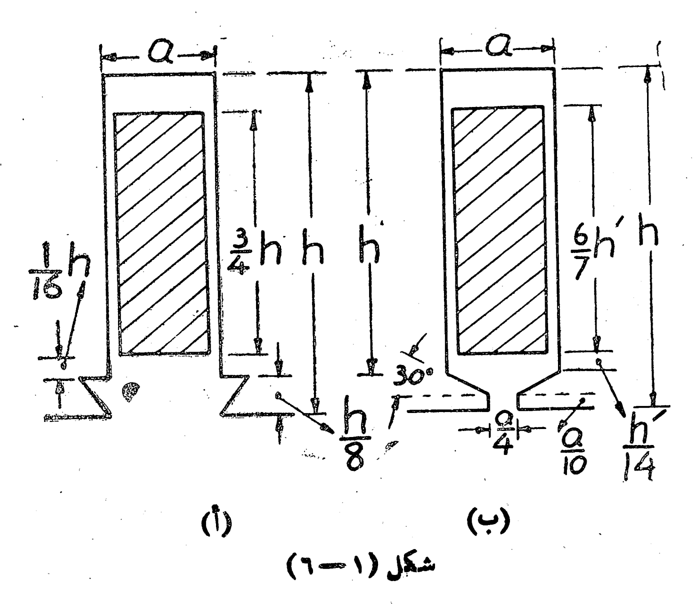
$$v \ \text{m/sec} = \frac{\pi D n_s}{6000} = \frac{\pi D n_s}{2 \times 3000} = \frac{\pi D}{2p} = \tau_p \ \text{cms}$$

لذلك يراعى تحديد قيمة τ_p ، إذا أردنا تحديد السرعة المحيطية للآلة . وفى الآلات التوربينية التى تعمل فى المحطات المائية ، وتديرها التوربينات المائية ، يؤدى رفع الحمل فجأة إلى زيادة فى سرعة الآلة ، حتى تصل إلى 180% من n_s ، وذلك بسبب عزم القصور الذاتى الكبير للمياه المتدفقة ، التى لا يستطيع المنظم حجزها ، إلا بعد وقت ملحوظ ، كما سبقت الإشارة اليه فى الباب الرابع . لذلك تصمم مثل هذه الآلات على أساس احتمالها هذه السرعات العالية . فاذا اعتبرنا أن السرعة يجب ألا تتعدى 90 متراً فى الثانية ، فمعنى هذا أن السرعة المحيطية للآلة ، المناظرة لسرعة التزامن n_s ، يجب ألا تتعدى الرقم $\frac{90}{1,8} = 50$ متراً فى الثانية . وفى هذه الحالة لا يجب أن يتعدى طول الخطوة القطبية للآلة الرقم 50 سنتيمترا . فاذا نتج عن زيادة الحمل ، الذى يتم تصميم الآلة على أساسه ، زيادة طول الخطوة القطبية عن هذا الرقم ، يجب تعديل التصميم على أساس أن الخطوة القطبية 50 سنتيمتراً فقط . وفى هذه الحالة سوف يزداد طول الآلة لمواجهة الزيادة المطلوبة فى حجم حديد المنتج ، مما يؤدى إلى زيادة ملحوظة فى قيمة λ عن تلك التى أعطيت فى الجدول السابق . وعلى العكس من ذلك نجد أنه فى حالة الآلات ، التى تستخدم معها حدافة ، تحتاج إلى جعل الخطوة القطبية أطول من المعتاد ، مما يؤدى إلى إعطاء λ قيما أقل من تلك التى جاءت فى الجدول السابق .

بالنسبة للطول المثالى l_i ، يجب أن نحدد على أساسه الأطوال l_a , l_p , b_c وكذلك عرض فتحة التهوية b_v ، كما سبق أن فعلنا فى حالة آلات التيار المستمر (هندسة الآلات الكهربية صفحة ٢٢٧ وشكل ٥ — ٤) . وتكون حدودنا فى هذه الحالة هى أن b_c تتراوح بين 8 , 10 سنتيمترات ، عندما لا يزيد عدد فتحات التهوية عن اثنين ؛ هذا ويكون عرض فتحه التهوية فى حدود سنتيمتر واحد .

اختيار عدد المجارى وتصميم ملفات المنتج :

يستخدم نوعان من المجارى فى الآلات المتزامنة ، المجـــارى المفتوحة (open slots) ، والمجارى نصف المغلقة (semi-closed slots) ، شكل (١



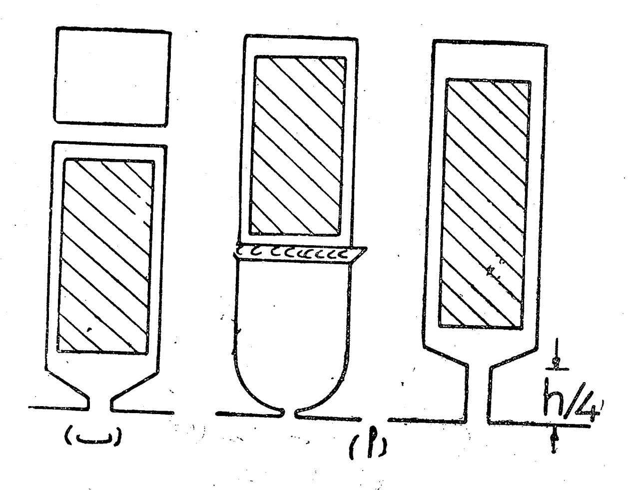
(أ) (ب)

شكل (١ — ٦)

—٦ أ ، ب) على الترتيب . وتستخدم المجارى المفتوحة مع الآلات ذات الأقطاب البارزة غالبا ، وذلك حتى يمكن تجهيز الملفات وعزلها ؛ ثم اسقاطها فى المجارى المفتوحة ، كما سبقت الإشارة اليه فى الباب الأول . وهذا لا يمنع من استخـدام المجارى نصف المغلقة مع هذا النوع من الآلات أيضا ، وذلك عندما تكون قدرتها صغيرة ، وعدد أقطابها منخفضا (أربعة أقطاب فى الغالب) . وعلى العكس من ذلك يكون الغالب استخدام المجارى نصف المغلقة فى حالة الآلات التوربينيـة ، وذلك لأن المجارى المفتوحة تتسبب فى زيادة مفقودات الحديد ، وارتفاع نسبة التوافقيات العالية فى منحنى الضغط . ولكن يمكن مع ذلك استخـدام المجـارى المفتوحة مع الآلات التوربينية ذات القدرات المنخفضة، عند تصميمها على ضغوط

مرتفعة . هذا وتكون المجارى ذات جدران متوازية (prallel sided) فى جميع الأحوال .

يختلف شكل المجرى ، فى بعض الحالات الخاصة ، عما جاء فى شكل (١ — ٦) . ويبين شكل (٢ — ٦ أ) شكلين للمجرى ، عندما يراد زيادة التسرب فى المجارى



شكل (٢ — ٦)

لتحديد قيمة تيار القصر المفاجىء ، كما يمكن أن يتخذ المجرى الشكل المبين فى شكل (٢ — ٦ ب) ، عندما يراد الوصول بفاعلية التهوية إلى قلب المجرى .

يتوقف اختيار عدد المجارى لكل مرحله تحت كل قطب q غالبا على طول الخطوة القطبية ، وعلى الضغط . فكلما قل طول الخطوة القطبية ، وارتفعت قيمة الضغط ، كلما زاد الإتجاه نحو تقليل عدد المجارى فى الآلة . وفيما يلى بعض الحدود التى يمكن أن تقع فيها قيمة q .

الآلات ذات الأقطاب البارزة $1.5 \leq q \leq 5$

الآلات التوربينية $5 \leq q \leq 12$

وتكون حدود خطوة المجرى بالسنتيمترات كما يلى :

الآلات ذات الأقطاب البارزة . $2.5 \leqslant \tau_s \leqslant 6.5$

الآلات التوربينية : $3 \leqslant \tau_s \leqslant 7$

تزود الآلات ذات الأقطاب البارزة فى الغالب بملفات مزدوجة الطبقة . ويفضل ، لتحسين شكل موجة الضغط ، وتموجات الأسنان ، استخدام قيمة كسرية لـ q ، وقد سبق ايضاح هذا كله فى البابين الأول والثانى . ونحتاج ، لتصميم ملفات المنتج ، على هدى ماجاء فى هذين البابين ، إلى تحديد عدد الموصلات الكلية Z ، بعد تحديد قيمة q . ويكون ذلك إما عن طريق معادلة القوة الدافعة الكهربية ، أو من قيمة AC ، كما سبق أن فعلنا مع آلات التيار المستمر .

تحديد ابعاد المجرى :

نبدأ أولا بتحديد مساحة مقطع الموصل اللازم لحمل تيار الحمل الكامل I ، وذلك عن طريق فرض قيمة مناسبة لكثافة التيار δ_a فى موصلات المنتج ، وهى تتراوح بين 2,5 — 3,8 أمبير لكل مم٢ فى الآلات ذات الأقطاب البارزة ، وبين 2 — 3 أمبير/مم٢ فى الآلات التوربينية . هذا ويجب أن يتراوح حاصل الضرب δ_a AC بين الحدين 1000 — 1800 فى نوعى الآلات . ويراعى ، عند تحديد مساحة الموصل وبعديه ، عمل حساب إستدارة الموصل عند الأركان ، كما سبق أن فعلنا فى آلات التيار المستمر ، كما يراعى أن الموصل سوف يوضع فى المجرى بحيث يكون عرضه فى إتجاه عمق المجرى ، كما سبق شرحه فى آلات التيار المستمر (هندسة الآلات الكهربية صفحة ٥٥٦ ، شكل (١ — ١٢ — ح)) .

يمكن حساب عرض المجرى وعمقه ، بنفس الطريقة التى اتبعناها فى آلات التيار المستمر ، وذلك بترتيب الموصلات فى المجارى ، مع أخذ سمك العازل عليها ، وفى المجارى ، فى الحسبان (هندسة الآلات الكهربية صفحة ٥٥٧ إلى صفحة ٥٦١) ، مع فارق وحيد ، وهو أن يكتفى ، عند حساب سمك العازل على الموصلات ، فى حالتنا هذه ، أن يضاف ملليمتر واحد إلى كل من طول وعرض الموصل .

هذا ويمكن إيجاد عرض السنة عند القمة b_t ، وعرض المجرى b_s ، أى عند سطح المنتج ، على أساس قيمة معينة للنهاية العظمى لكثافة الفيض فى الأسنان B_{tm} ، وذلك بالإستفادة من المعادلتين (١٧ — ٤) ، (٢٠ — ٤) فى كتاب هندسة الآلات الكهربية ، على النحو التالى :

$$\phi_t = \frac{\phi}{\alpha \frac{S}{2p}} \quad , \quad \phi_t = B_{mt} \times k_{ia} \times l \times b_t$$

حيث k_{ia} هو معامل حديد المنتج ، l هو مجموع أطوال قطاعات المنتج .

$$\phi = B_a \, \tau_p \, l_i = B_a \frac{\pi D}{2p} l_i$$

$$\therefore \quad B_{tm} \times k_{ia} \times l \times b_t = \frac{B_a \frac{\pi D}{2p} l_i}{\alpha \frac{S}{2p}}$$

$$b_t = \frac{l_i}{l k_{ia}} \times \frac{B_a}{\alpha B_{tm}} \times \tau_s$$

$$b_s = \tau_s - b_t = \tau_s \left[1 - \frac{l_i B_a}{l k_{ia} \alpha B_{tm}} \right] \quad \cdots\cdots \quad (٦-٦)$$

يراجع عمق المجرى h ، والنسبة بين عمقه وعرضه a بعد ذلك على الحدود الآتية :

الآلات ذات الأقطاب البارزة : $3 \leqslant h \leqslant 10$ cms

الآلات التوربينية : $4.5 \leqslant h \leqslant 16$ cms

تستخدم الأرقام العالية مع الآلات ذات القدرات الكبيرة ، وتقل قيمة h كلما انخفضت قيمة قدرة الآلة ، كما أن حدود هذه الأرقام تكون صحيحة عند عدم استخدام فتحات تهوية فى المجرى ، على حسب ما هو مبين فى شكل (٢ — ٦ ب) .

الآلات ذات الأقطاب البارزة : $3 \leqslant \frac{h}{a} \leqslant 4$

الآلات التوربينية : $4 \leqslant \frac{h}{a} \leqslant 7$

يجب بعد تحديد أبعاد المجرى المراجعة على كثافة الخطوط المغناطيسية عند أضيق مقطع للسنة ، أو عند المقطع الذى يبعد عنه بمقدار ثلث ارتفاع السنة ، بنفس الطريقة التى اتبعناها فى آلات التيار المستمر (هندسة الآلات الكهربية من صفحة ٢٣٤ إلى صفحة ٢٤٤) ، مع ملاحظة أن أضيق مقاطع السنة فى الآلات المتزامنة يكون عند القمة ، نظراً لأن المنتج هو العضو الثابت فى هذه الحالة ، وملاحظة أن الفرق بين كثافة الخطوط الظاهرية وكثافتها الحقيقية قد لا يكون واضحاً ، عندما تقل الكثافة الظاهرية عن 18000 خط/سم٢ . هذا ويجب أن تتراوح قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط عند القمة من 18500 خط/سم٢ إلى 16000 خط/سم٢ ، يقابلها عند المقطع الأوسط للسنة القيمتان 15500 خط/سم٢ ، 13500 خط/سم٢ .

تحديد عمق قلب المنتج تحت الاسنان :

يكون تحديد عمق قلب المنتج تحت الأسنان ، على أساس قيمة معينة لكثافة الخطوط المغناطيسية ، بنفس الطريقة التى اتبعناها فى آلات التيار المستمر (هندسة الآلات الكهربية صفحتى ٢٤٥ ، ٢٤٦) . هذا وتتراوح كثافة الخطوط فى هذه الحالة بين 10000 خط/سم٢ و 13000 خط/سم٢ فى الآلات ذات الأقطاب البارزة ، وبين 10000 خط/سم٢ و 14000 خط/سم٢ فى الآلات التوربينية .

طول الثغرة الهوائية :

يتم تحديد طول الثغرة الهوائية فى الآلات المتزامنة، فى حالات كثيرة ، كما فعلنا فى آلات التيار المستمر ، على أساس حد معين ، نسمح به ، بالنسبة لتحوير أو تشويه شكل منحنى المجال المغناطيسى للأقطاب الرئيسية Distortion of field (waveform) بفعل المجال المغناطيسى للفات المنتج (رد فعل المنتج) . ويتوقف هذا التحوير ، الذى يسمح به، علاوة على ذلك، على شكل حذاء القطب ، وكذلك على القوة الدافعة المغناطيسية لكل من رد فعل المنتج ، والأمبير لفات على الأقطاب الرئيسية . فاذا فرضنا أن النسبة بين قيم النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية عند الحمل الكامل ، وقيمها عند اللاحمل ، هى 1.5 ، وأن النسبة α $\left(= \frac{b_e}{\tau_p} \right)$ تتراوح قيمتها بين الحدين من 0.55 إلى 0.7 ، نجد أن نسبة طول الثغرة الهوائية إلى الخطوة القطبية τ_p ، فى الآلات ذات الأقطاب البارزة، تقع هى الأخرى بين حدين مناظرين ، هما على الترتيب :

$$\frac{\delta_o}{\tau_p} = 0.55 \frac{AC}{B_a} \; (\alpha = 0.55) \; ,$$

$$\frac{\delta_o}{\tau_p} = 0.64 \frac{AC}{B_a} \; (\alpha = 0.7) \quad \dots \quad (٧-٦)$$

ويمكن عموما حساب قيمة تقريبية لكل قيم α هى :

$$\frac{\delta_o}{\tau_p} \cong 0.5 \frac{AC}{B_a} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٨-٦أ)$$

فاذا كان حذاء القطب مشكل بحيث يعطى شكلا جيبيا لمنحنى المجال بين حدى القطب، يمكن أن نأخذ قيمة δ_o من المعادلة الآتية :

$$\delta_o \cong 0.3 \frac{AC}{B_a} \tau_p \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٨-٦ب)$$

وهذه هى قيمة δ_o عند منتصف القطب ، وهى تزداد بمقدار 50 % تقريبا عند حدى القطب .

بالنسبة للآلات التوربينية يمكن استخدام النسبة الآتية لتحديد قيمة δ_o :

$$\frac{\delta_o}{\tau_p} = 0.2 \frac{AC}{B_a} \quad \ldots\ldots \quad (٨-٦ح)$$

وعموما فانه فى حالة الآلات التى يكون قطرها كبيرا ، وهى التى يكون عدد الأقطاب فيها 24 أو أكثر ، نستطيع تحديد طول الثغرة الهوائية من المعادلة :

$$\delta_o \geqq 0.001 \text{ D cms} \quad \ldots\ldots \quad (٩-٦)$$

عرض الفك فوق أسنان المنتج :

لتحديد القطر الخارجى للمنتج نحتاج إلى تحديد عرض الفك فوق أسنان المنتج، على أساس قيمة متوسطة لكثافة الفيض المغناطيسى فى مقطع هذا الفك ، وتتراوح هذه القيمة فى الحدود من 10000 خط/سم٢ إلى 14000 خط/سم٢. ويمكن الحصول على سمك الفك h_y باعتبار أن $\frac{\Phi}{2}$ خط تمر فيه بالكثافة B_y ، وذلك من المعادلات الآتية :

$$\frac{\Phi}{2} = B_a \frac{\tau_p}{2} l_i = B_y k_{ia} l h_y$$

$$h_y = \frac{B_a}{B_y} \cdot \frac{\tau_p}{2} \cdot \frac{l_i}{k_{ia} l} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (٦-١٠)$$

ابعاد القطب :

سبق أن بينا فى الباب الثانى أننـا نهتم اهتماما كبيرا بأن يكون شكل منحنى المجال المغناطيسى للأقطاب الرئيسية جيبيا ، أو أقرب ما يكون إلى ذلك ، لأننا نستفيد بضغط التوافقية الإساسية لهـــذا المنحنى فقط ، بينما ينتج عن ضغط التوافقيات العليا فيه زيادة فى المفقودات . ويمكن تحقيق ذلك عن طريق تغيير طول الثغرة الهوائية على مدى الخطوة القطبية ، وذلك باعطاء حذاء القطب شكلا خاصا ، يتحدد بناء على أطوال الثغرة الهوائية عند النقط المختلفة بين حدى القطب ، كما يتضح من شكل (٣-٦ أ) ، حيث يمكن تحديد الأطوال δ_x بدلالة δ_o من المعادلة :

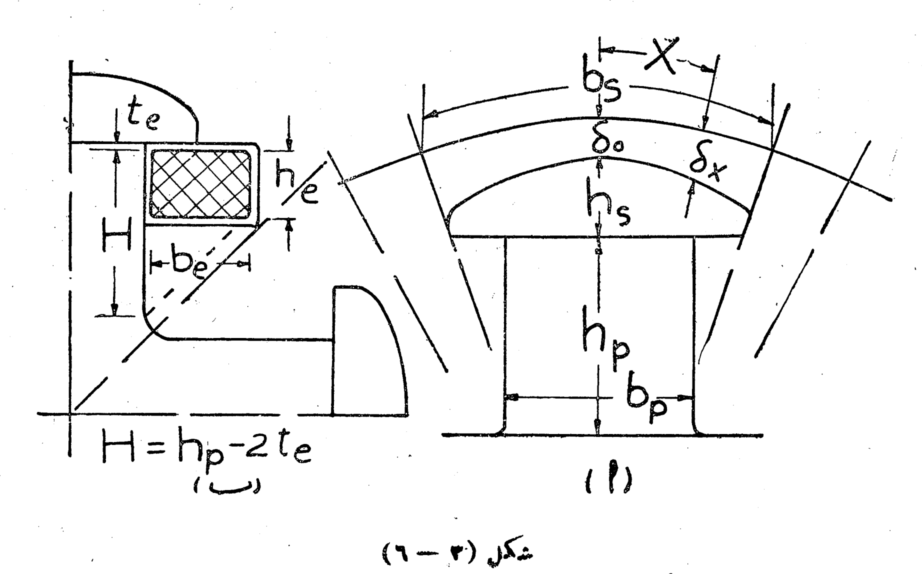
$$\delta_x = \frac{\delta_o}{\cos \frac{\pi}{\tau_p} x} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (٦-١١)$$

هذا وتتحدد نهايتا الحذاء على الجانبين بناء على نسبة طول قوس الحذاء b_s إلى الخطوة القطبية τ_p ، فى الحدود الآتية :

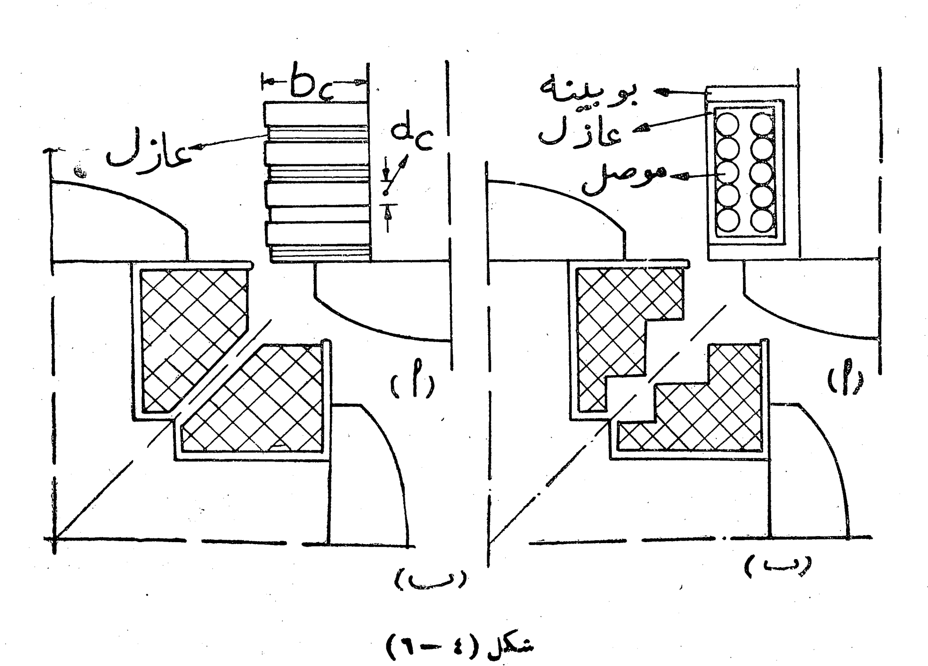
$$0.55 \leq \frac{b_s}{\tau_p} \leq 0.8 \quad \cdots\cdots \quad (٦-١٢)$$

وتتأثر هذه النسبة بارتفاع الحذاء h_s ، فمع مراعاة هذا الإرتفاع يجب أن تقل قيمة النسبة كلما قل عدد الأقطاب ، وصغر محيط الآلة عنـد الثغرة الهوائية (Bohr circumference) . فاذا ما تحددت قيمة هذه النسبة ، على هذا الأساس ،

يمكن تحديد ارتفاع حذاء القطب h_s من الرسم ، كما هو مبين فى شكل (٣ — ٦أ). ويتراوح هذا الإرتفاع فى المتوسط بين 3 سم و 6 سم تقريبا .



شكل (٣ — ٦)



شكل (٤ — ٦)

يتحدد عرض قلب القطب b_p بناء على قيمـــة الفيض المغناطيسى فى قلب القطب ϕ_p ، الذى يزيد عن الفيض فى الثغـرة الهوائيـة ϕ بحوالى 20 % ، بفعل التسرب عند الحمل للكامل ($\phi_p \cong 1.2\ \phi$) ، وعلى طـول القطب l_p ، الذى تحدد من قبل (عند تحديد l_i) ، وكذلك عـلى قيمـة كثافة الخطوط المغناطيسية المسموح بها B_p ، والتى تتراوح بين 12000 خط/سم٢ و 16000 خط/سم٢ ، وذلك باستخدام المعادلة الآتية :

$$b_p = \frac{\phi_p}{B_p\, l_p} \text{ cms} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (\text{١٣} - \text{٦})$$

يتوقف ارتفاع القطب h_p على طريقة ترتيب ملفات المجال على الأقطاب ، بشرط الإستفادة من الفراغ بين الأقطاب أقصى استفادة مستطاعة . بالرجوع إلى شكل (٣—٦ب) نجد أن هذا الشرط يتحقق عندما تكون مساحة النحاس $f_e\, h_e\, b_e$ أكبر مايمكن ، حيث f_e هى المعامل الفراغى (space factor) للملفات . وهو نفس المعامل الذى سبق تعريفه بالنسبة لملفات المجال فى آلات التيار المستمر ، الذى هو عبارة عن النسبة بين مساحة مقاطع موصلات النحاس فى مقطع الملفات ، ومساحة هذا المقطع نفسه . وباعتبار أن t_e هو سمك العازل على الملفات (يمكن فرض قيمة t_e حوالى 3 مم تقريبا) ، نجد أن :

$$f_e\, h_e\, b_e = f_e\, h_e \left[(h_p - 2t_e) - h_e \right] \tan \frac{\pi}{2p} \quad \cdots \quad (\text{١٤} — \text{٦})$$

تبلغ قيمة f_e حوالى 0,65 فى حالة استخدام موصلات دائرية المقطع ، بينما تصل إلى حوالى 0,85 عند استخدام الموصلات مستطيلة المقطع القائمة على جانبها فوق القطب .

بمفاضلة المعادلة (١٤ — ٦) بالنسبة لـ h_e والمساواة بالصفر على الشرط

اللازم لتحقيق الإستفادة من الفراغ بين الأقطاب أقصى استفادة ممكنة :

$$h_e = \frac{1}{2}(h_p - 2t_e) \quad , \quad b_e = h_e \tan\frac{\pi}{2p} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٦ — ١٥)$$

لكى يمكن تحديد قيمة مناسبة لـ h_p يجب معرفة كيف يكون ترتيب الملفات، وطريقة وضعها على الأقطاب أولا ، ثم تحديد قيمة معينة ومناسبة لـ b_e وبالتالى h_e .

ترتيب ملفات المجال :

يتم فى الغالب تجهيز الملفات قبل وضعها على الأقطاب بلفها على بوبينة (bobin) ، يصنع جسمها من رقائق الحديد أو الزنك ، ولها شفتين (two flanges) مصنوعتين من الحديد أو الزنك أو البرونز ، وذلك لكى تكون أسهل صنعا ، ولكى يمكن تغييرها عند حدوث أى تلف بها شكل (٤ — ٦ أ) هذا ويكون مقطع الموصل فى الملفات إما دائريا أو مستطيلا . ويستخدم المقطع الدائرى فى الملفات عندما تكون المساحة صغيرة ، وفى هذه الحالة يمكن تدريج الملفات ، كما هو مبين فى شكل (٤ — ٦ ب) لكى تزيد فاعلية التهوية بزيادة سطح الملفات المعرض للجو الخارجى ويستخدم المقطع المستطيل إذا زادت المساحة عن الحد الذى يسمح باستعمال المقطع الدائرى . وفى هذه الحالة يلف الموصل على البوبينة قائما على جانبه الضيق ، ويكون عزل اللفات ، عن بعضها البعض ، بالورق أو الميكانيت ، بين الطبقات المتتالية فقط ، بحيث يظل سطحها الخارجى معرضا للهواء ، لكى تزيد فاعلية التهوية ، كما هو واضح فى شكل (٤ ٦ أ) . وتكون أبعاد الموصل فى الحدود الآتية :

$$20 \leq b_c \leq 70 \text{ mms} \quad , \quad d_c \geq 0.5 + 0.01\, b_c \text{ mms} \quad \ldots \quad (٦ — ١٦)$$

ويفضل عدم ادخال مجارى للتهوية بين مقاطع الملفات على الأقطاب عادة ،

وذلك بسبب الصعوبة البالغة التى تعترض عمل مثل هذه المجارى . ويكتفى فى الغالب بزيادة فاعلية التهوية بالطرق المذكورة أعلاه ، مع استخدام الهوايات لزيادة حجم هواء التبريد .

يفضل استخدام المقطع المستطيل ، القائم على جانبه الضيق ، فى ملفات المجال فى الآلات البارزة ، التى يكون عدد الأقطاب فيها صغيراً . ذلك لأن درجة الإستفادة من مثل هذه الآلات تتوقف على فاعلية ملفات المجال ، فى هذه الحالة، لسببين : الأول أنه يمكن زيادة درجة الحرارة النهائية ، التى يسمح بتشغيل الملفات عندها ، خمس عشرة درجة تقريبا عن الحالات التى تستخدم فيها الموصلات ذات المقطع المستدير، والثانى أنه على الرغم من سوء استغلال الفراغ بين الأقطاب عند استخدام المقطع المستطيل القائم على جانبه ، عندما يقل عدد الأقطاب فى الآلة ، تكون القوة الدافعة المغناطيسية ، التى نستطيع ترتيبها على كل قطب ، بهذه الطريقة ، أكبر من تلك التى نحصل عليها باستخدام المقطع الدائرى .

أما بالنسبة للآلات التى يكون عدد الأقطاب فيها كبيرا ، والتى تتوقف درجة الإستفادة منها على المنتج نفسه ، فيستخدم عادة المقطع المستدير، وتقل درجة حرارة الملفات النهائية عن الدرجة المسموح بها ، حيث يتم تصميم الملفات على أساس أقل قيمة للمفقودات التى تبددها على شكل حرارى ، وذلك لكى يقل تأثيرها على معامل جودة الآله .

يلف الموصل ، القائم على جانبه الضيق ، دون بوبينة عادة ، على قلب القطب المعزول مباشرة ، ويتم كبسه على القطب تحت ضغط كبير، مع تحميصه داخل الفرن ، بحيث يصبح القطب والملف جسما واحداً ، لاتؤثر عليه القوة الطاردة المركزية الناشئة عن الدوران ، شكل (٤ — ٦ أ) .

تحديد مساحة مقطع الموصل وضغط التنبيه :

إذا فرضنا أن :

مساحة مقطع الموصل فى ملفات المجال بالمليمترات المربعة $q_e \ mm^2$

ضغط التنبيه الموصل إلى ملفات المجال بالفولت $V_e \ V$

الطول المتوسط لكل لفة من ملفات المجال بالمتر $l_m \ m$

الحرارة النوعية لمادة الموصل عند درجة الحرارة النهائية أوم مم٢/م
$\rho \ ohm. \ mm^2/m$

الامبير لفات على كل قطب رئيسى عند الحمل الكامل AT_p

أمبير لفات رد فعل المنتج لكل قطب AT_a

القدرة الداخلية للآلة 3EI بالفولت أمبير $N_{si} \ VA$

قيمة النهاية العظمى لكثافة الفيض فى الثغرة الهوائية خط/سم٢ $B_g \ lines/cm^2$

نجد أن :

$$N_{si} = 3EI = 3IT_{ph} \times B_a \ \tau_p \ l_i \ f \times 4.44 \times 10^{-8} k_w$$

$$3IT_{ph} = \frac{2p \ \pi \ AT_a}{2\sqrt{2} \ k_w}$$

$$N_{si} = \frac{2p \ \pi \ AT_a}{2\sqrt{2} \ k_w} \times \sqrt{2}\pi \times \frac{2}{\pi} B_g \ \tau_p \ l_i \ f k_w \times 10^{-8}$$

$$N_{si} = 2p\pi AT_a B_g \ \tau_p \ l_i \ f \times 10^{-8} \quad \ldots\ldots \quad (٦—١٧)$$

$$AT_a = \frac{N_{si} \times 10^8}{2p\pi B_g \tau_p \ l_i f} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٦—١٨)$$

$$p_e = \frac{\rho\, l_m \times 2p\, AT_p}{V_e} = \frac{\rho\, l_m \times 2p}{V_e} \cdot \frac{AT_p}{AT_a} \cdot AT_a$$

$$= \frac{AT_p}{AT_a} \cdot \frac{\rho\, l_m\, N_{si} \times 10^8}{\pi\, B_g\, \tau_p\, l_i\, f\, V_e} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (١٩ — ٦)$$

بالتعويض فى المعادلة (١٩ — ٦) بالقيم التقريبية التالية ، ووضع λ بدلا من $\frac{l_i}{\tau_p}$ ، نجد أن :

$$l_m \cong 2\,l_i + \tau_p \text{ cms} \quad , \quad B_g \cong 8000 \text{ lines/cm}^2$$

$$\frac{AT_p}{AT_a} \cong 2{,}0 \quad , \quad \rho \cong 0.023 \text{ ohm. mm}^2\text{/m (at}90°\text{C)}$$

$$q_e \cong 1.84 \frac{(2\lambda + 1)}{f\lambda\, \tau_p} \cdot \frac{N_{si}}{V_e} \text{ mm}^2 \quad \ldots\ldots \quad (٢٠ — ٦)$$

يتم تحديد ارتفاع القطب h_p من المعادلة (١٥ — ٦) ، وكذلك بعدى مقطع الملفات b_e و h_e ، فى نفس المعادلة ، وبعدى الموصل b_c و d_c ، فى المعادلة (١٦ — ٦) ، ومساحة مقطع الموصل q_e ، مع اختيار ضغط التنبيه المناسب V_e ، فى المعادلة (١٩ — ٦) ، بحيث يمكن تنفيذ الملفات ، وتحقيق هذه المعادلات فى نفس الوقت . ولكى يسهل عمل ذلك يمكن اعتبار سمك العازل الخارجى بين القطب والملفات حوالى 3 مم .

كثافة التيار والمفقودات النحاسية فى ملفات المجال :

يتضح لنا من البند السابق أن حسابات ملفات المجال ، فى الآلات المتزامنة ذات الأقطاب البارزة ، تتبع نفس الخط العريض ، الذى اتبع عند حساب ملفات المجال الملفات التوازى فى آلات التيار المستمر . ويظهر ذلك بجلاء عند مقارنة الشق الأول من المعادلة (١٩ — ٦) ، التى بنيت على أساسها الحسابات

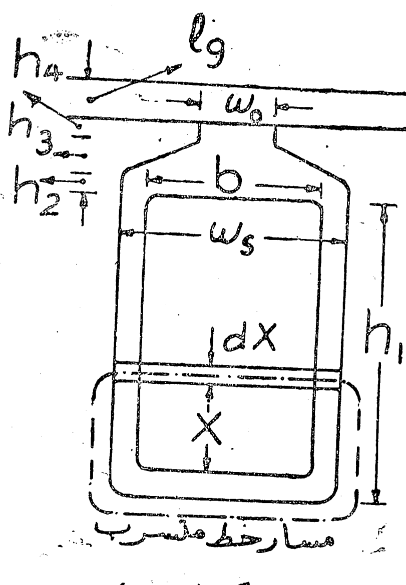
فى الآلات المتزامنة ، بالمعادلة (١٠ — ١٢) فى كتاب هندسة الآلات الكهربية ، وهى التى بنيت على أساسها الحسابات فى ملفات التوازى . وعلى هذا الأساس نستطيع تحديد المفقودات الكلية فى ملفات المجال ، والمفقودات النوعية ، التى يبددها السطح المعرض للجو الخارجى ، بدلالة أبعاد الملفات وكثافة التيار فى هذه الملفات ، بنفس الطريقة التى اتبعناها فى حالة ملفات التوازى فى آلات التيار المستمر ، فنحصل على معادلات مماثلة للمعادلات (٨ — ١٢) ، (٩ — ١٢) ، (١١ — ١٢) ، (١٦ — ١٢) فى كتاب هندسة الآلا ت الكهربية . وتتراوح قيمة كثافة التيار فى ملفات المجال ، بالنسبة للآلات المتزامنة ذات الأقطاب البارزة ، بين 2,5 أمبير/مم٢ و 3,5 أمبير/مم٢ . أما فى الآلات التوربينية فيمكن زيادة هذه الكثافة إلى 4,5 أمبير/مم٢ ، كما أن حاصل ضرب كثافة التيار فى ملفات المجال والحمل النوعى الكهربائى يكون محدودا فى الآلات التوربينية أيضا بالحدين من 1500 إلى 3500 .

حساب المقاومة وممانعة التسرب المرحلية :

يكون حساب المقاومة على أساس مساحة مقطع الموصلات ، والطول المتوسط لكل لفة فى ملفات المنتج ، الذى نحصل عليه من الرسم ، وذلك عند درجة حرارة التشغيل المعتادة للآلة . ثم تزاد قيمة المقاومة بنسبة معينة لأخذ الظاهرة القشرية (skin effect) ، وتأثيرها على المفقودات النحاسية ، عندما يكون التيار مترددا . ويتم ذلك بضرب المقاومة ، التى نحصل عليها بالطرق العادية $\left(R=\rho \frac{l}{a}\right)$ فى معامل الظاهرة القشرية K_d ، وهو دالة لعمق الموصل h_c فى إتجاه عمق المجرى ، ونسبة عرض النحاس العارى فى المجرى إلى عرض المجرى α ، على النحو التالى :

$$K_d \cong 1 + \frac{4}{45} (h_c \alpha_s)^4 \quad \dots\dots\dots \quad (٢١-٦)$$

$$\alpha_s \cong \sqrt{\frac{\text{عرض المجرى العارى}}{\text{عرض النحاس}}} = \sqrt{\frac{b}{\omega_s}} \quad \text{شكل (٥ — ٦)}$$



شكل (٥ — ٦)

ويراعى أن تكون قيمة $h_c \, \alpha_s$ أقل من 0,7 حتى يمكن تطبيق المعادلة (٢١ — ٦). وإلا فمن الواجب تقسيم الموصل إلى شرائح يفصل بينها عازل، ويكون عمق الشريحة بحيث تكون قيمة $h_c \, \alpha_s$ للشريحة أقل من 0,7 .

أما بالنسبة لمانعة التسرب المرحلية فانها تحسب على أساس حساب الفيض المغناطيسى المتسرب حول المجارى ϕ_s ، والفيض المغناطيسى حول الأطراف المعلقة للملفات ϕ_o . ويمكننا حساب قيمة كل من ϕ_s و ϕ_o بحساب قيمة السماح المغناطيسى (permeance) ، لمسار كل منهما ، وضربه فى الأمبير لفات التى تدفعه فى هذا المسار ، كما سبق أن فعلنا فى آلات التيار المستمر . وسوف نستفيد

فى الواقع من النتائج التى حصلنا عليهـــا هناك ، تفاديا لإضاعة المجهود فى التكرار .

قياسا على المعادلة (١٨ — ١٢) ، صفحة ٥٧٩ فى كتاب هندسة الآلات الكهربية ، نجد أن السماح المغناطيسى λ_s لمسار الفيض ϕ_s المتسرب حول المجرى، المبين أبعاده فى شكل (٥ — ٦) ، لكل سنتيمتر واحد من طول حديد المنتج هو :

$$\lambda_s = \frac{h_1}{3\,\omega_s} + \frac{h_2}{\omega_s} + \frac{2\,h_3}{\omega_s + \omega_o} + \frac{h_4}{\omega_o} + \frac{l_g}{\tau_s} \quad (٦\text{-}٢٢)$$

وتكون قيمة النهاية العظمى للفيض المغناطيسى المتسرب حول المجارى هى :

$$\phi_s = 0.4\,\pi \sqrt{2}\; I\,u \times 2\,l_a\,\lambda_s = 3.55\; I\,u\,\lambda_s\,l_a \quad \ldots \quad (٦—٢٣)$$

حيث l_a هى طول حديد المنتج بالسنتيمترات . وتستخدم معادلة تجريبية لحساب قيمة النهاية العظمى للفيض المغناطيسى ϕ_o المتسرب حول الأطراف المعلقة ، حيث :

$$\phi_o = k\,q\,I\,u\,l_o \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٦ - ٢٤)$$

k ثابت تكون قيمته حوالى 2,8 بالنسبة للملفات مفردة الطبقة ، وتكون قيمته 1,8 تقريبا بالنسبة للملفات مزدوجه الطبقة ، l_o هو طول الطرف المعلق لكل موصل ، ويمكن حسابه بعد تصميم الملفات .

كما يمكن حساب l_o أيضا بصورة تقريبية من المعادلة :

$$l_o \cong 2\,\tau_p \left(1 + \frac{2\,V \times 10^{-3}}{\tau_p} \right) \quad \ldots\ldots \quad (٦—٢٥)$$

حيث $V \times 10^{-3}$ هو ضغط الآلة المرحلى بالكيلوفولت .

ويمكن الحصول على نسبة هبوط الضغط بسبب ممانعة التسرب المرحلية ، وهى $\frac{IX_l}{E}$ ، بقسمة مجموع ϕ_s و ϕ_o على ϕ الفيض المغناطيسى المناظر لكثافة الخطوط المغناطيسية B_a فى الثغرة الهوائية ، حيث :

$$\varepsilon = \frac{IX_l}{E} = \frac{\phi_o + \phi_s}{\phi} = \frac{\phi_o + \phi_s}{B_a \tau l_i} \quad \cdots (٢٦-٦)$$

كما يمكن تعويض ($\phi_o + \phi_s$) بدلا من ϕ ، فى معادلة القوة الدافعة الكهربية ، للحصول على قيمة هبوط الضغط فى ممانعة التسرب المرحلية عند الحمل الكامل IX_l .

حساب ملفات التخميد :

لاتوجد قوانين ثابتة يمكن التعويل عليها فى حسابات ملفات التخميد ، ونكتفى باعطاء بعض المعادلات التجريبية ، التى يمكن الإستفادة بها فى هذا المضمار . تكون مقاطع قضبان التخميد (damper bars) مستديرة ، ويوجد منها فى وجه حذاء كل قطب من خمسة إلى عشرة ، تبلغ مساحتها معا ما يساوى من 0,1 إلى 0,3 مساحة مقاطع موصلات المنتج لكل قطب ، كما تبلغ مساحة مقطع الحلقة الطرفية (damper ring) ،التى تصلها معا،نصف هذه المساحة تقريبا . هذا وتكون القضبان عادة من البرونز لكى تعطى نفس المقاومة ، مع مساحة مقطع أكبر ، مما يساعد على زيادة تبديد الحرارة من سطوحها .

مثال (١) : 625 KVA , 600 r.p.m., 3000 V

سوف نوجد قطر الآلة بالطرق المختلفة ، باستخدام المعادلات (٣-٦) ،

(٥ — ٦) ، (٥ — ٦ أ) ، ويجب ملاحظة أن هناك تقريبات وقيم تجريبية فى هذه المعادلات تجعل من الصعب الحصول على نفس النتيجة فى كل مرة . ولكن يجب أن تتقارب النتائج على كل حال . ويتوقف ذلك بطبيعة الحال على مدى الدقة المنتظرة فى القيم التجريبية المستخدمه . وتكون النتائج التى تعطيها المعادلة (٥ — ٦) عموما أقل من المعادلتين الآخرتين ، لذلك يجب عدم إستخدامها ، إلا عندما يراد معرفة المدى الذى يقع فيه قطر الآلة بالتقريب فقط .

أولا — باستخدام المعادلة (٣ — ٦) : نفرض أن $B_a = 5400$ خط/سم٢ وأن $AC = 310$ أمبير موصل/سم من محيط المنتج ، $k_w = 0.96$ مؤقتا :

$$C_o = 0.183 \times 5400 \times 310 \times 0.96 \times 10^{-11} = 2.94 \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon \simeq 0.12 \quad , \quad N_{sN} = 625 \times 10^3 \text{ VA}$$

$$N_{si} = 625 \times 10^3 (1 + 0.12 \times 0.6) = 670 \times 10^3 \text{ VA}$$

$$p = \frac{60 \times 50}{600} = 5 \quad , \quad \lambda = 0.5\sqrt{5} = 1.12$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{10 \times 670 \times 10^6}{1.12 \times \pi \times 600 \times 2.94}} = 102.6 \text{ cms}$$

$$\tau_p = \frac{\pi \times 102.6}{10} = 32.3 \text{ cms} \quad ,$$

$$l_i = 1.12 \times 32.3 = 36.2 \text{ cms}$$

ثانيا — باستخدام المعادلة (٥ — ٦) :

$$D = 12 + 1.3\sqrt{\frac{85 \times 625 \times 5}{600 \times 1.12}} \simeq 107.5 \text{ cms}$$

ثالثا ـــ باستخدام المعادلة (٥ ـــ ٦ أ) : (سوف نتخذ نتائجها أساسا لباقى الحسابات)

$$\tau_p = 5.3 + 2.025 \sqrt{\frac{670 \times 10^3}{5 \times 50 \times 1.12}} = 32.4 \text{ cms}$$

$$D = \frac{10 \times 32.4}{\pi} = 103 \text{ cms} \quad , \quad l_i = 36.3 \text{ cms}$$

باعتبار المنتج مكون من ستة قطاعات عرض كل منها $l' = 5.8$ سنتيمتراً يصبح مجموع أطوال قطاعات الستة $l = 34.8$ سنتيمترا . يفصل بين القطاعات خمس فتحات تهوية عرض كل منها سنتيمترا واحد ، وبذلك يكون الطول الكلى للمنتج هو $l_a = 39.8$ سنتيمترا ($= 34.8 + 5$) . فاذا اعتبرنا أن طول القطب l_p يقل عن ذلك بحوالى 2 سنتيمترا ، نجد أن $l_p = 37.8$ سنتيمترا ، وهذا كله يتفق مع القاعدة بأن $l_i = \frac{l + l}{2}$ ، حيث :

$$l_i = \frac{34.8 + 37.8}{2} = 36.3 \text{ cms}$$

وهو ما يتفق مع النتيجة التى حصلنا عليها ، مما يجعل هذه الأطوال نهائية ، بحيث نعتمد عليها بعد ذلك .

بمراجعة السرعة المحيطية عند سطح المنتج الداخلى v_a نجد أن :

$$v_a = \tau_p \text{ cms} = 32.4 \text{ m/sec.}$$

$$1.8\, v_a = 32.4 \times 1.8 = 58.3 \text{ m/sec.} < 80 \text{ m/sec.}$$

بأخذ عدد المجارى لكل مرحلة تحت كل قطب $q = 4$ ، نجد أن عـــدد المجارى الكلية على الآلة هو $S = 6\, qp = 120$ ، وتكون قيمة خطوة المجرى

$$\tau_s = \frac{\pi D}{S} = \frac{\pi \times 103}{120} = 2.7 \text{ cms}$$ (فى الحدود)

يمكن حساب عدد اللفات فى كل مرحلة T_{ph} من معادلة القوة الدافعة الكهربية مباشرة .

$$V = \frac{3000}{\sqrt{3}} = 1732 \text{ V} \quad , \quad E \cong 1.072 \text{ V} \cong 1860 \text{ V}$$

$$k_w = k_d = \frac{\sin 30}{4 \sin 7.5} = 0.957 \left(\alpha = \frac{360 \times 5}{120} = 15^\circ \right)$$

$$\therefore \; 1860 = 4.44 \times 50 \times T_{ph} \times 5400 \times 36.2 \times 32.4 \times 0.957 \times 10^{-8}$$

$$T_{ph} = 138 \quad , \quad U \cong \frac{138 \times 6}{120} \cong 6.9 = 7$$

بأخذ سبعة موصلات فى كل مجرى نحصل على $T_{ph} = 140$ ، وهذا يستدعى تعديل B_g إلى 5320 جاوس بدلا من 5400 جاوس . كذلك يجب تعديل AC ، التى استخدمت فى المعادلة (٣ — ٦) ، حتى لا تتغير النتائج التى حصلنا عليها عند استخدام هذه المعادلة ، فتصبح AC تساوى 315 بدلا من 310 $\left(315 = 310 \; \frac{5400}{5320}\right)$ وذلك حتى لا تتغير قيمة C_o .

إذا كنا سنعتمد على النتائج ، التى حصلنا عليها باستخدام المعادلة (٥ — ٦ أ) يجب أن نحسب AC على هذا الأساس ، حيث :

$$AC = \frac{IZ}{\pi D} \quad , \quad I = \frac{625 \times 1000}{\sqrt{3} \times 3000} = 120 \text{ A}$$

$$AC = \frac{120 \times 120 \times 7}{\pi \times 103} = 312 \text{ ampcond./cm}$$

يجب المراجعة على قيمة الأمبير موصلات Iu فى كل مجرى ، ويجب الاتزيد هذه القيمة عن 1500 .

$$Iu = 120 \times 7 = 840 << 1500$$

لكى يمكن المراجعة على كثافة الخطوط المغناطيسية عند أضيق مقطع فى السنة، يجب أولا حساب أبعاد المجرى ، ونبدأ بتحديد مساحة مقطع موصلات المنتج ، على أساس قيمة معينة لكثافة التيار ، ولتكن $\delta_a = 3.5$ أمبير/مم٢

$$(1800 > \delta AC = 3{,}5 \times 312 = 1100)$$

$$q = \frac{120}{3{,}5} = 34{,}3 \text{ mm}^2$$

بدلا من تحديد بعدى الموصل ، ثم المراجعة على كثافة الفيض ، نحدد عرض السنة المناسب عند سطح المنتج b_t على قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط فى الأسنان B_{tm} ، باستخدام المعادلة (٦ — ٦) ، ثم نحدد بناء على ذلك بعدى الموصل ، على النحو التالى :

بفرض أن قيمة B_{tm} المسموح بها هى 18500 خط/سم٢ وأن $\alpha = \frac{2}{\pi}$ و $0{,}9 = k_{ia}$ ، نجد أن :

$$b_t = \frac{36.3 \times 5320 \times \pi \times 2.7}{0.9 \times 34.8 \times 2 \times 18500} = 1.4 \text{ cms}$$

$$b_s = 2.7 - 1.4 = 1.3 \text{ cms}$$

باعتبار أن سمك العازل المستخدم لبطانة المجرى 2 مم ، وسمك العازل على الموصل نفسه يزيد فى عرضه 1 مم ، والفضفضة فى عرض المجرى حوالى 0,5 مم (هندسة الآلات الكهربية صفحة ٥٥٥ إلى صفحة ٥٦١) ، يكون عرض

الموصل العارى ، الذى يدخل فى المجرى بعرضه السـابق ، هو 7,5 مم . بعمل حساب زيادة المساحة ، الناتجة عن ضرب بعدى الموصل فى بعضهما ، نتيجـة لإستدارة الجوانب، نجد أن عمق الموصل ، فى إتجاه عمق المجرى، هو d :

$$d = \frac{34.3}{0.9 \times 7.5} \cong 5.1 \text{ mm}$$

تزاد هذه القيمة 1 مم لأخذ حساب العازل حول الموصل فى الحسبان، فتصبح 6.1 مم للموصل المعزول ، ويكون عمق الموصلات السبعة 42.7 مم . بالرجوع إلى شكل (١ — ٦) نجد بالنسبة للمجرى نصف المقفل أن :

$$h' = 42.7 \times \frac{7}{6} = 50 \text{ mms} \quad , \quad \frac{a}{4} = 3.25 \text{ mms}$$

$$\frac{a}{10} = 1.3 \text{ mm} \; , \; 9.75 \times \tfrac{1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 2.82 \text{ mms}$$

$$h = 50 + 1.3 + 2.82 = 54.12 \text{ mms}$$

بمراجعة قيمة $\frac{h}{a}$ نجد أنها تساوى $\left(4.15 = \frac{54.12}{13}\right)$ 4,15 وهى فى الحدود المسموح بها تقريبا .

لإيجاد سمك الفك h_y فوق الأسنان نستخدم المعادلة (١٠ — ٦) ، بفرض أن B_y يساوى 12500 خط/سم٢

$$h_y = \frac{5320}{12500} \times \frac{32.4}{2} \times \frac{36.3}{0.9 \times 34.8} = 8.05 \text{ cms}$$

لتحديد طول الثغرة الهوائية δ_o عند منتصف القطب نستخدم المعادلة (٨ — ٦ ب)

$$\delta_o \cong 0.3 \frac{312}{5320} \times 32.7 = 5.7 \text{ mms} \cong 6 \text{ mms}$$

نستطيع بعد ذلك تحديد شكل منحنى حذاء القطب بتحديد طول الثغرة الهوائية عند النقط المختلفة باستخدام المعادلة (١١ — ٦) . أما طول قوس الحذاء b_s فيتحدد باستخدام المعادلة (١٢ — ٦) بفرض قيمة للنسبة $\frac{b_s}{\tau_p}$ تساوى حوالى 0.64 حيث

$$b_s \cong 0.64 \times 32.4 = 20.75 \text{ cms}$$

بفرض أن الفيض المغناطيسى فى القطب ϕ_p عند الحمل الكامل 1,2 من قيمة ϕ وبفرض أن كثافة الخطوط المغناطيسية تساوى حوالى 16000 خط/سم٢ فى هذه الحالة نجد أن

$$\phi_p = 1.2 \times 5320 \times 32.4 \times 36.3 = 7.5 \times 10^6 \text{ خط}$$

$$b_p = \frac{7.5 \times 10^6}{16000 \times 37.8} = 12.4 \text{ cms}$$

يمكن بعد ذلك الحصول على سمك الحذاء h_s بعمل الرسم المبين فى شكل (٣ — ٦ أ) . ونحتاج فى هذه الحالة إلى تحديد ارتفاع القطب h_p أولا . وهذا يستلزم تصميم ملفات المجال ، مع تحديد قيمة ضغط التنبيه V_e ، الذى نفرض أنه يساوى 50 فولت باستخدام المعادلة (٢٠ — ٦) نجد أن

$$q_e = 1.84 \frac{(2 \times 1.12 + 1)}{50 \times 1.12 \times 32.4} \cdot \frac{670 \times 1000}{110} = 44 \text{ mm}^2$$

$$b_c = 35 \text{ mm} \quad , \quad d_c = 1.25 > 0.5 + 0.01\, b_c \,(= 0.85)$$

يضاف حوالى 0,25 مم إلى d_c لأخذ سمك العازل فى الحسبان ، فيصبح عمق الموصل المعزول 1,5 مم . وبفرض أن كثافة التيار لاتتعدى حوالى 3 أمبير/مم٢ تكون أقصى قيمة لتيار التنبيه هى :

$$I_{fm} = 3 \times 44 = 132 \text{ amps}$$

فاذا اعتبرنا أن أقصى قيمة للأمبير لفات AT_p [1] على الأقطاب تبلغ حوالى $2.2\ AT_a$ نجد أن :

أمبير لفة/قطب

$$AT_p = 2,2 \times 1,35 \times \frac{140}{5} \times 120 \times 0.957 = 9550$$

وهذا يحدد عدد اللفات على كل قطب T_e ، حيث :

$$T_e = \frac{9550}{132} = 73 \text{ لفة}$$

ويكون الإرتفاع اللازم لإستيعاب هذه اللفات h_e هو

$$h_e = 73 \times 1.5 \simeq 110 \text{ mms}$$

بالمراجعة على المعادلة (١٥ — ٦) نجد أن

---

(١) بعد تحديد أبعاد الآلة الرئيسية ، باستخدام هذه الأرقام التقريبية ، نستطيع رسم منحنى التمغطس للآلة ، بفرض قيما مختلفة للفيض ، وتحديد تيارات التنبيه المناظرة (أو الأمبير لفات اللازمة لدفع الفيض فى الدائرة المغناطيسية للآلة) وكذلك القوة الدافعة الكهربية E . ثم نحدد قيمة AT_p برسم مخطط المتجهات كما جاء فى الباب الثالث ، ومن ثم نحدد I_{fm} ونراجع على كثافة التيار .

$$b_e = 110 \tan 18 = 110 \times 0.3249 = 35.7 \cong b_c$$

كذلك نحصل باستخدام الشق الآخر من المعادلة على h_p ، حيث

$$h_p = 2h_e + 2t_e = 220 + 4 = 224 \text{ mms}$$

نحصل عن سمك حذاء القطب باستخدام الرسم المبين فى شكل (٣—٦أ) ،ونجد فى هذه الحالة أن هذا السمك يساوى 4 سنتيمترا تقريبا .

لحساب مقاومة المنتج وممانعة التسرب المرحلية يجب أولا حساب معامل الظاهرة القشرية K_d وطول الطرف المعاق للموصل l_o ، باستخدام المعادلتين (٢١ — ٦) ، (٢٥ —٦) .

ويلاحظ أن قيمة K_d مع الموصل الذى عمقه 5,1 مم سوف تكون كبيرة بصوره غير محتملة ، لذلك يجب تقسيم الموصل إلى ست شرائح[1] سمك كل منها $\frac{5,1}{6} = 0,85$ ، وعزلها عن بعضها البعض بطبقة رقيقة جدا من العازل

$$\alpha_s \cong \sqrt{\frac{7.5}{13}} \cong 0.76 \quad b_c = 0.85 \text{ mm}$$

$$K_d \cong 1 + \frac{4}{45} (0.85 \times 0.76)^4 \cong 1.0153$$

$$R_a = 1.0153 \times \frac{0.023}{34.3} \times \frac{280}{100} (39.8 + l_o)$$

$$l_o \cong 2 \times 32.4 \left(1 + \frac{2 \times 1.732}{32.4}\right) \cong 71.6 \text{ cms}$$

---

(١) راعينا فى هذا التقسيم ألا تزيد قيمة $\alpha_s b_c$ عن 0,7 لأن المعادلة (٢١ — ٦) لا يمكن تطبيقها على الحالات التى تزيد فيها قيمة $\alpha_s b_c$ عن 0,7 .

$$R_a = 0.212 \quad , \quad \frac{I R_a}{V} \times 100 = 1.47 \ \%$$

بالرجوع إلى شكل (٥ — ٦) ، ومقارنته بالشكل (١ — ٦)، نجد أن الأبعاد، اللازمة للتعويض فى المعادلة (٢٢ — ٦) فى حالتنا هذه ، هى

$$h_1 = 41.7 \ , \ h_2 = 4.15 \ , \ h_3 = 2.82 \ , \ h_4 = 1.3 \ \text{mm}$$

$$\omega_o = \frac{a}{4} = 3.25 \quad , \quad \omega_s = a = 13 \ \text{mms}$$

$$\lambda_s = \frac{41.7}{3 \times 13} + \frac{4.15}{13} + \frac{2 \times 2.82}{13 + 3.25} + \frac{1.3}{3.25} + \frac{6}{324} = 2.1555$$

بتطبيق المعادلتين (٢٣ — ٦) ، (٢٤ — ٦) للحصول على ϕ_s ، ϕ_o :

$$\phi_s = 3.55 \times 120 \times 7 \times 2.1555 \times 39.8 = 0.256 \times 10^6 \ \text{خط}$$

$$\phi_o = 2.8 \times 4 \times 120 \times 7 \times 71.6 = 0.672 \times 10^6 \ \text{خط}$$

بالتعويض فى المعادلة (٢٦ — ٦) للحصول على نسبة هبوط ضغط ممانعة التسرب :

$$\varepsilon = \frac{IX_l}{E} = \frac{(0.256 + 0.672) \times 10^6}{5320 \times 36.3 \times 32.4} = \frac{0.928}{6.25} = 0.148$$

مسائل على الباب السادس

1 — Determine approximate stator core dimensions for a 23400 — KVA, 50 cycle, 3—Phase turbo — alternator, under the following limitations : Mean gap density, 5000 Lines per cm^2, ampere – conductors per cm of periphery, 560, peripheral speed, 144 m per sec., air gap, 3 cm.

2 – Prove that the KVA — rating of synchronous machine is equal to 10.4 $\bar{B}$ ac D^2 Ln 10^{-11}, when $\bar{B}$, ac, D,L and n are the mean value of the flux density over the pole — pitch, the ampere — conductors per cm of periphery, the diameter and length of the stator in cm, and the rev. per sec. respectively. Assuming that the winding is uniformly distributed and has a 60° phase-spread, determine approximately the diameter and length of the stator of a 2500 — KVA, 50 — cycle, 2 — pole, turbo alternator, given : $\bar{B}$ = 4500, ac = 250, airgap = 2 cm. The peripheral speed must not exeed 100 cm per sec.

3 — A 2 — pole 3000 — rev. per min. alternator has a core length of 1.5 m. selecting the following values for the mean flux — density over the pole pitch $\bar{B}$, the ampere — conductors – per cm ac, and the peripheral speed v, determine the output obtainable from the machine : $\bar{B}$ = 5000 lines per cm^2, ac per cm = 260, v = 100 m per sec.

4 — Determine approximate stator core dimensions for a 23400 K.V.A., 50 cycle, 3 phase turbo — alternator

(2 pole) under the following limitations ;

Mean gap density 5000 lines/cm^2

Ampere — conductors per cm. of periphary 500

Peripherl speed 144 m/sec.

Air gap 3 cm.

5 — A 2 pole, 3000 R.P.M. alternator has a core length of 1,5 meter. Selecting the following values for the mean flux density over the pole pitch, the ampere — conductors per cm & the peripheral speed, determine the outpnt obtainable from the machine :

Mean flux density 5000 lines/cm^2

Ampere — conductor/cm 250

Peripheral speed 100 m/sec.

6 — Determine the leading dimensions of a 3 phase, 1500 K.V.A., 0,8 P.F., 3000 volts, 50 cycle alternator to run at a speed of 375 r.p,m. if the peak flux denisty in the air gap is about 9000 gauss & the specific electric loading 375 ampere-conductor/cm approximately Find the slots per pole per phase, number of conductors per slot & size of each slot.

7 — Determine the main dimensions, no. of slots & conductors/slot for a water wheel alternator from the fellowing particulars ;

10000 K.V.A., 125 r.p.m. 0.8 P.F., three phase, star connected, 6600 volts, 25 cycle. Max. peripheral speed not to exceed 70 m/sec. at 95 % overspeed. Assume mean flux denisty 5800 lines/cm^2 & ampere

— conductor/cm 320 approximately.

8 — A 3 phase alternator giving 800 K.V.A. at 2300 volts, 300 r.p.m., 50 cycle has a stator bore of 190 cms diameter & a core length of 24 cms.

Using data obtained from this machine design an alternator to give 1200 K.V.A. at 3300 volts, 250 r.p.m., 50 cycle. Find also the number of solts and of conductors per slot and the approximate dimensions of the conductors.

9 — Determine the size of conductors & the number of turns required on each pole of the field winding of a 20 pole alternator from the following data ;

max. excited voltage 110 volts

ampere turns/pole 9000

dimensions of rectangular pole 14 x 28 cm.

available winding length/pole 15 cm.

thickness of insulation between conductors 0.02 cm.

the windings on all poles are in series.

10 — Deduce an expression for the output coefficient for a 3 phase dynamoelectric machine and use this expression to determine the diameter and length of core and number of slots for a 3 phase star connected alternator to give : 1200 KVA 3300 V 50 c.p.s at 0.8 power factor lagging at a speed of 500 r.p.m.

Assume maximum flux density in gap = 9000 lines per cm square, and ampere conductors per cm of

periphery = 350.

Give reasons for the values chosen.

11 — Deduce an expression for the output coefficient for a 3 phase dynamo — electric machine and use this expression to determine the diameter and length of core and number of slots for a 3 phase star connected alternator to give :

100 K.V.A., 550 volts, 50 c.p.s.: 1500 r.p.m., assuming an electric loading of 300 A.C./cm. and average air gap induction of 6000 gauss. Give reasons for the values chosen.

12 — A three phase alternator having a full load rating of 1000 KVA at 0.8 power factor, 2200 volts, 50 c.p.s., 300 r.p.m has a stator diameter of 190 cms, core length of 30 cms and 180 slots. Using the information from this machine, with suitable modifications where required, determine the diameter, core length, number of slots and conductors per slot for a three phase machine to give 2000 KVA at 0.8 power factor, 6600 volts, 50 c.p.s. 600 r.p.m.

13 — Determine the main dimensions for 2500 KVA, 3 phase, 6600 volt, 50 c/s, 600 r.p.m., star connected salient pole synchronous machine. (gen.),

The specific magnetic loading is about 5000 gauss and the specific electric loading is about 400 amp. cond./cm and the current density is about 380 amp/sq. cm. The stator bore diameter can be taken four times the core length.

Determine the number of stator slots and the number of

conductors per slot.

If the field amp. turns at no load is assumed 1.2 times the armature reaction amp. turns at full load and if the cross and demagnetizing coefficients are taken 0.45 and 0.86, find the amp. turns necessary for the main field at full load 0.8 power factor lagging. Neglect stator resistance and leakage reactance.

14 — A 3 phase, 200 KVA 1000 V, star connected alternator has a frequency of 50 c/s at a speed of 750 r.p.m. The maximum flux density in the air gap is 7000 gauss and the electric loading is 240 ampere conductors/cm at a current density of 3 amps/mm^2, Find the diameter, length of armature, number of slots and number of turns per phase. If the reactance of each phase is 10 times the resistance and the field form contains a third harmonic with an amplitude of 10% of that of the fundamental, calculate the current circulating due to that harmonic in the armature winding when connected in delta Assume the length of the overhang on both sides of each coil 3.5 times the length of the pole pitch. Take length of rotor = 0.5 diameter.

15 — Find the main dimensions for a 1500 KVA, 3 phase, 3300 V, 50 c/s, 375 R.P.M., star connected, salient pole synchronous generator. The specific magnetic loading is about 6000 gauss and the specific electric loading is about 375 amp. cond./cm. The length of the stator core can be taken 1.25 times the pole

pitch. Determine also the number of stator slots and the number of conductors per slot.

If the field ampere turns at no load is assumed 1.2 times the armature reaction ampere turns at full load, and if the cross and demagnetising coefficients are taken 0.45 and 0.86, find the ampere turns necessary for the main field at full load, 0.8 power factor lagging. Neglect stator resistance and leakage reactance.

الباب السابع

القواعد الأساسية للمحول الكهربى

Basic principles of the electric Transformer

دواعى استخدام المحول وتكوينه الأساسى :

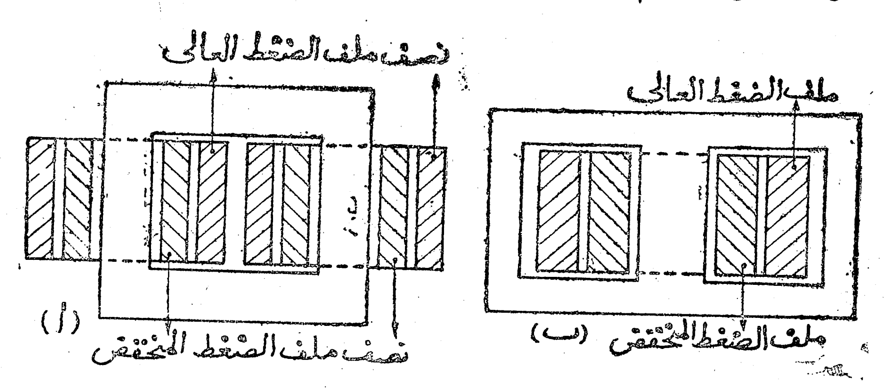
المحول الكهربى عبارة عن جهاز (أو آلة) يستخدم لخفض أو رفع الضغط الكهربى، لكمية من القدرة الكهربية ، فى مقابل التضحية بأقل نسبة ممكنة من هذه القدرة ، يبددها المحول كمفقودات ، على شكل طاقة حرارية ، كما يحدث فى كل الآلات . وقد بدأت الحاجة الملحة إلى استخدام المحول عندما تركز توليدالقدرة الكهربية ، بكميات هائلة ، فى محطات كبيرة ، للاسباب التى سبقت مناقشتها فى الباب الرابع ، وأصبح الأمر يستدعى نقل هذه القدرة إلى مواطن استخدامها ، مع تكبد أقل كمية ممكنة من المفقودات ، وبأقل ثمن ، وذلك عن طريق رفع الضغط إلى أقصى قيمة ، لخفض قيمة التيار ، وبالتالى تقليل حجم الموصلات ، عندما تعذر تهيئة المولدات نفسها لإعطاء الضغوط بالقيم العالية المطلوبة . فبينما تقوم المولدات بتوليد القدرة الكهربية عند ضغط لايزيد عادة عن 11 كيلوفولت (أقصى قيمة ممكنة توصلنا اليها حوالى 18 كيلو فولت) ، فان نقل القدرة على ضغط تبلغ قيمته نصف مليون فولت ، كما هو الحال بالنسبة لكهرباء السد العالى ، لايمثل منتهى الأمل فى هذا المضمار . هذا ، ومن ثم فقد أصبح استخدام المحولات لازما أيضا عند مواطن استعمال القدرة الكهربية ، لخفض ضغط النقل العالى بما يناسب أجهزة الإستهلاك .

ويحتوى المحول الكهربى ، مثل الآلات الكهربية الأخرى ، على دوائر كهربية ودوائر مغناطيسية ، كما تسرى الطاقة الكهربية فى الدوائر الكهربية بفعل تشابك الخطوط المغناطيسية بهذه الدوائر . ولكن لاتوجد أجزاء دوارة فى المحول الكهربى ، ومن هنا ينشأ الفارق الجوهرى والأساسى بينه وبين الآلات الكهربية الدوارة . إذ بينما تمثل القوة الدافعة الكهربية الديناميكية المضادة ، المتولدة فى ملفات المنتج ، فى المحرك الكهربى ، رد الفعل الناشىء عن عزم الدوران المضاد للحمل ، على عمود إدارة المحرك ، فان القوة الدافعة الكهربية الإستاتيكية المضادة المتولدة فى الملف الإبتدائى للمحول ، تمثل رد الفعل على هذه الدائرة ، الذى ينشأ عن طريقه سريان القدرة الكهربية من الملف الإبتدائى إلى الملف الثانوى ، ومن ثم إلى الحمل . ويصبح المحول ، بهذه الطريقة ، آلة كهربية استاتيكية (static electrical machine) يقوم عملها على أساس التأثير الكهرومغناطيسى (Electro-magnetic induction) ، وليس على أساس تحـــويل الطاقة الكهروميكانيكى (Electro – mechanical energy conversion) ، كما هو الحال فى الآلات الكهربية الدوارة (rotating electrical machine) .

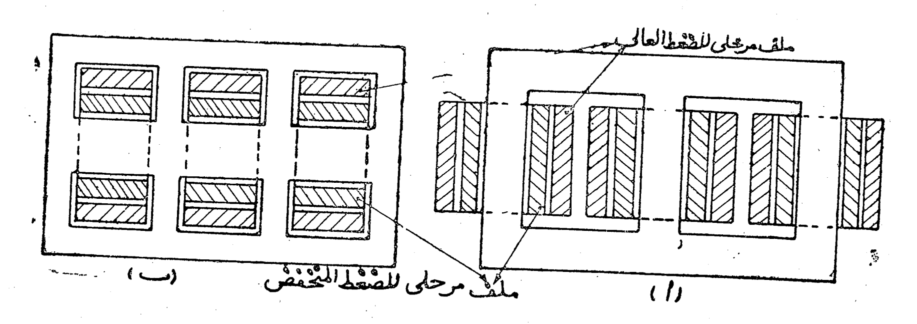
يتكون المحول الكهربى أساساً من ملفين معزول كل منهما عن الآخر كهربيا عزلا تاما ، بحيث يكون دائرة كهربية مستقلة . ويوصل أحدهما إلى الينبوع الكهربى ، المراد تحويل ضغطه ، ويسمى لذلك بالملف الإبتدائى (primary winding) بينما يوصل الآخر بالحمل ، ويسمى بالملف الثانوى (secondary winding) . ويسمى الملفان أحيانا بدلالة الضغط على كل منهما ، فيكون الملف ذو الضغط الأكبر هو ملف الضغط العالى (high voltage winding) ، والملف ذو الضغط الأصغر هو ملف الضغط المنخفض (low voltage winding)

وتتوقف طريقة عمل المحول على نظرية التأثير المتبادل بين الملفين (effect of mutual induction) من حيث أن الفيض المغناطيسى ، الناشىء عن مرور تيار الينبوع فى الملف الإبتدائى ، حول هذا الملف ، يمكن أن يتشابك مع الملف الثانوى ، فيولد فيه قوةدافعة كهربية ، يمكن عن طريقها نقل بعض القدرة الكهربية إلى الحمل الموصل على طرفى هذا الملف . ويكون نقل القدرة الكهربية من الملف الإبتدائى ، أوالينبوع ، إلى الملف الثانوى ، أوالحمل ، عن طريق المجال المغناطيسى، الذى يتمثل فى الفيض المغناطيسى المتبادل (mutual magnetic flux) ، المتشابك تماما مع كل من الملفين ، وهو مايتوقف على معامل الإزدواج بينهما (coefficient of coupling) (بند ١٣ كتاب هندسة الآلات الكهربية صفحة ١٠٥ إلى صفحة ١١٠). كذلك تتم عملية التحويل بكفاءة أعلى ، كلما ازدادت قيمة معامل الإزدواج ، بحيث تصل العملية إلى قمة الكفاءة ، عندما تكون هذه القيمة هى الواحد الصحيح . وهذا يستدعى أن تتشابك جميع خطوط الفيض المغناطيسى ، الذى ينشئه الملف الإبتدائى ، مع الملف الثانوى ، وبالعكس . والطريقة المثلى ، للحصول على نتائج أقرب ماتكون إلى ذلك ، أن يوضع الملفان على قلب حديدى واحد ، تكون معاوقته المغناطيسية صغيرة جدا بالنسبة لمعاوقة مسار الخطوط المغناطيسية فى الهواء ، بحيث يتركز سير هذه الخطوط فى القلب الحديدى ، فيما عدا نسبة ضئيلة جدا ، تتوقف قيمتها على مدى تشبع هذا القلب بالخطوط ، ويطلق عليها اسم الفيض المغناطيسى المتسرب (leakege flux) . ويسمى المحول فى هذه الحالة محول ذو قلب حديدى (iron cored transformer)، ويتركز عيب وجود القلب الحديدى أساسا فى المفقودات الحديدية التى تحدث بداخله ، بسبب المجالات المغناطيسية المترددة ، الناشئة عن التيارات المترددة ، نظرا لأن المحول لايقوم بوظيفته إلا مع الضغوط والتيارات المترددة ، التى

يمكن حدوث التأثير المتبادل فى وجودها . هذا ويمكن التقليل من أثر العيب المذكور ، إلى أقصى درجة ممكنة ، بعمل القلب الحديدى من رقائق معزولة عن بعضها البعض ، لخفض قيمة مفقودات التيارات الإعصارية ، كما أن انخفاض قيمة التردد المستخدم عموما ، وهو 50 ذبذبة فى الثانية ، يساعد على ذلك ، من هذه الناحية ، ومن ناحية تقليله لمفقودات التخلف المغناطيسى أيضا (هندسة الآلات الكهربية من ص ٨٧ إلى ص ٩٧) . وهذا يعنى حتمية عدم استخدام القلب الحديدى فى المحولات ، التى تقوم بتحويل الضغوط ذات الترددات العالية ، مثل تلك التى تستخدم فى دوائر الراديو ، إذ يكون مسار الخطوط المغناطيسية ،



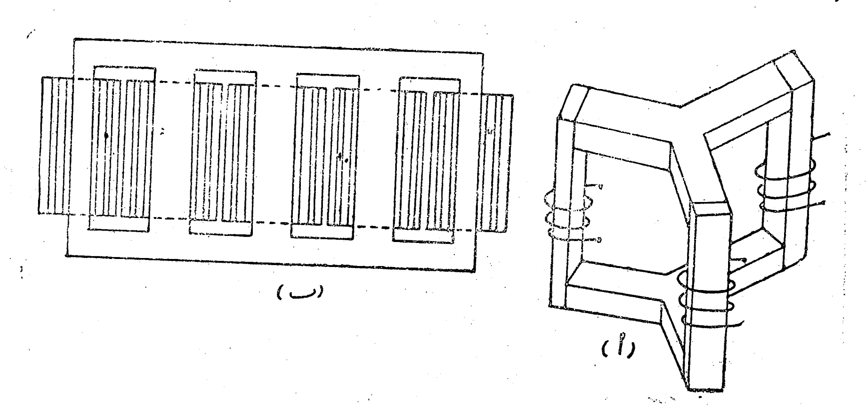
شكل (١ — ٧)



شكل (٢ — ٧)

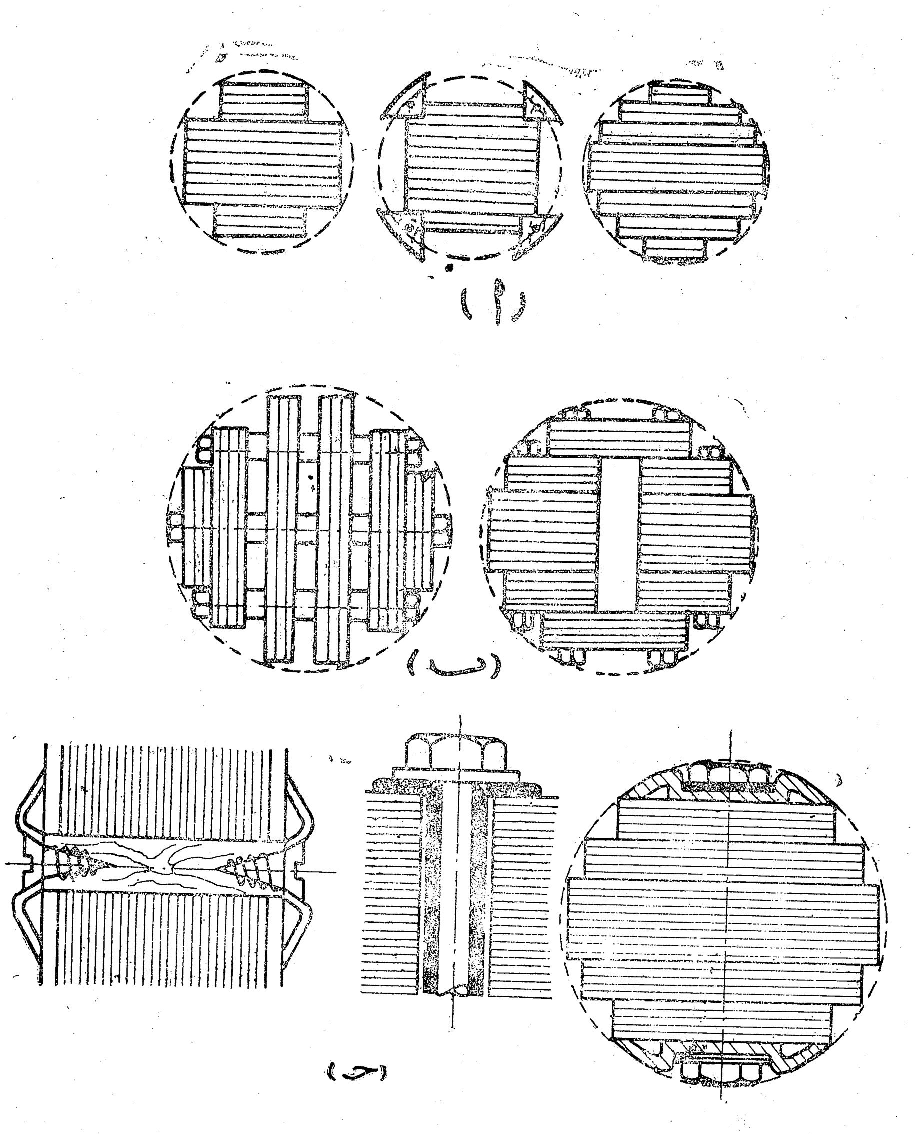
فى مثل هذه المحولات ، فى مادة ذات معامل نفـاذ مغناطيسى صغير ، مثل الهواء ، ويطلق عليها اسم المحولات الهوائية (air cored transformer) .

يبين شكل (١ — ٧ أ) ترتيب الملفات على القلب الحـديدى لمحـول مفرد أو أحادى المرحلة (single phase transformer) . وهذا من نوع المحول ذى القلب (core type transformer) وهو عبارة عن ساقين ، توضع عليهما الملفات ، وفكين لتكملة القلب الحديدى . فى ب من نفس الشكل نجد النوع المسمى بالمحول الهيكلى (shell type transformer)، ويلاحظ أن مساحة مقطع الساق الوسطى تكون ضعف مسـاحة مقطع كل من السـاقين الطـرفيين . ولا يوجد أى فارق فى الخواص الكهربية الرئيسية لهذين النوعين ، وإنما يكون الاختلاف فقط فى اعداد الملفات ، وترتيبها على القلب الحديدى ، ومسار الفيض المغناطيسى فى كل منهما ، وبعض الخواص الميكانيكية من ناحية القوى المؤثرة على الملفات عند حدوث دائرة قصر فيها . فى شكل (٢ — ٧ أ ، ب) نجد نوعى المحول ثلاثى المراحل ، ونعنى المحول ذا القلب ثلاثى المراحل (3-phase core type transformer) فى أ ، الذى يتكون من ثلاثة سيقان ، يوضع على كل



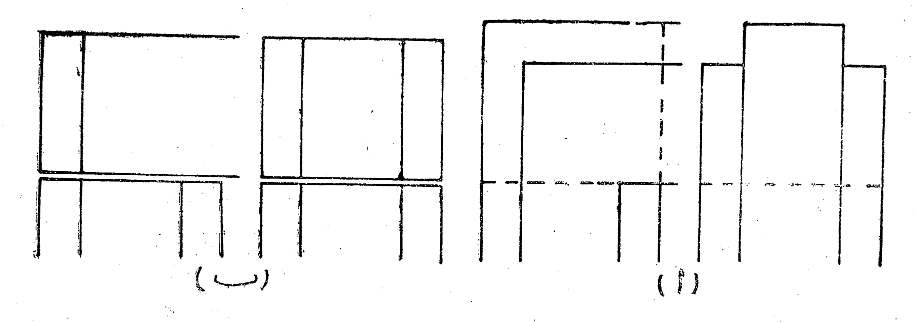
شكل (٢ — ٧)

منها مرحلة بملفيها ، والمحول من النوع الهيكلي فى ب (3-phase shell type transformer) ، الذى يتكون ببساطة من ثلاثة محولات أحادية المرحلة من نفس النوع. ويلاحظ أن الخطوط المغناطيسية ، بالنسبة للمرحلة الموضوعة على



شكل (٤ — ٢)

الساق الوسطى للمحول ذى القلب ثلاثى المراحل ، أقصر من مساريها على الساقين الطرفيين ، وهذا يؤدى إلى اختلاف فى تيارات المحول بدون حمل ، كما سيأتى ذكره فيما بعد . هذا ويمكن تلافى ذلك بعمل القلب الحديدى بالشكل المبين فى شكل (٣ــ٧ أ) وإن كان مثل هذا القلب لا يستخدم عادة فى الحياة العملية . كما أن هذا الإختلاف لا يوجد فى المحول الهيكلى ثلاثى المراحل ، أو فى المحــــول ذى القلب خماسى السيقان ثلاثى المراحل (5 core 3-phase transformer) المبين فى شكل (٣ ـ ٧ب) . ومن أهم مميزات هذا النوع أن مساحة مقطع الفك تكون حوالى 60 % من مساحتها فى المحول ذى القلب وهذا يؤدى إلى خفض إرتفاع المحول ، مما يجعل نقله ميسوراً فى بعض الحالات ، التى قد يتسبب ارتفاع المحول الشاهق نسبيا فيها ، فى جعل نقله متعذراً . ويبين شكل (٤ ــ ٧) الأشكال المختلفة لمقطع القلب الحديدى ، وطريقة إعداد قنوات التبريد بداخله ، مع ربط الرقائق معاً ، لخفض الطنين ، الذى يصدر عن المحول ، إلى أقصى درجة ممكنة ، هذا الطنين الذى ينشأ بسبب القوى المغناطيسية (magnetic forces) المؤثرة على الرقائق كما يبين شكل (٥ ــ ٧) كيفية ترتيب الفك (yoke) مع القلب الحديدى . وتظهر فى أ الطريقة المستخدمة مع المحولات الصغيرة ، ومتوسطة الحجم ، حيث تتداخل رقائق الفك مع رقائق الساق ، بحيث تتطابق هذه الرقائق جزئيا (overlap)



شكل (٥ ــ ٧)

عند موضع اتصال الفك بالساق . وفى ب تظهر الطريقة التى تستخدم مع المحولات الكبيرة ، حيث يوضع الفك فوق الساق مع وضع ورق مقوى أو ميكانيت بينهما. ويلاحظ أن طول الثغرة الهوائية الفعال يزداد فى هذه الحالة عن الحالة السابقة ، مما يؤدى إلى زيادة قيمة تيار المغطسة ، وكذلك تيار الحمل ، فى هذه الحالة . هذا ويتكون كل من السيقان (legs or cores) وكذلك الفكوك (yokes) من رقائق من سبيكة الحديد مع السليكون (لتقليل المفقودات الحديدية مع استخدام كثافة فيض عالية نسبيا) ، التى يكون سمكها 0.35 مم . ويعزل الرقائق عن بعضها البعض (للحد من مفقودات التيارات الإعصارية) طبقة من الورق ، الذى سمكه 0.02 — 0.03 مم ، والذى يلصق على أحد وجهى كل رقيقة ، أو من الورنيش أو الزجاج السائل ، الذى يدهن به أحد وجهى الرقيقة . وقد يكون مقطع القلب أو للساق على شكل مربع أو صليب، فى المحولات صغيرة ومتوسطة الحجم ، كما أنه يكون مدرجا فى المحولات الكبيرة شكل (٤ — ٧ب) ، أما بالنسبة لقنوات التبريد داخل الحديد ، فقد تكون فى إتجاه ترتيب الرقائق ، أو فى الإتجاه العمودى عليه ، كما هو مبين فى نفس الشكل . ويكون ربط الرقائق معا ، بحيث لا تعطى طنينا ، بسبب الاهتزازات الناشئة عن القوى المغناطيسية ، بوساطة أحزمة ، وهذه هى أبسط طريقة ، ويمكن أن تستخدم فى المحولات الصغيرة . ولكن تستخدم عادة المسامير ، التى تربط عليها الصواميل (Bolt and nut) ، أو المسامير المحواة (rivets) للحصول على الضغط المطلوب لمنع الطنين ، الذى يتراوح بين 5—8 كجم/سم٢ . ويجب عزل المسامير والصواميل عن حديد المحول (لتلافى حدوث مفقودات تيارات إعصارية زائدة) باستخدام اسطوانات وشرائح من الورق المقوى ، أو الخشب ، كما هو مبين فى شكل (٤ — ٧ حـ) . ونحتاج ، عندما يكون مقطع الحديد كبيرا ، إلى استخدام ألواح ضاغطة لتوزيع

الضغط على السطح (press plates) ، التي يستحسن أن تكون غير مغناطيسية . فاذا اضطررنا إلى استخدام مواد مغناطيسية مثل حديد الزهر ، أو الصلب المسبوك وجب تقسيمها إلى شرائح ، للحد من تأثير التيارات الإعصارية فيها .

الملفات : (Windings)

يوجد نوعان رئيسيان من الملفات فى المحولات ، وهما الملفات الإسطوانية (cylindrical windings) ، والملفات القرصية (disc windings) . فى الحالة الاولى تكون الملفات الإبتدائية والثانوية على شكل اسطوانات ، كما هو مبين فى شكل (٦ — ٧ أ) ، بينما تكون فى الحالة الثانية على شكل أقراص ، كما هو مبين فى نفس الشكل ب ، حيث تعنى .L. T (low tension) الملفات التى تنتمى إلى إلى الضغط المنخفض و .H. T (high tension) الملفات التى تنتمى إلى الضغط العالى ، فى الحالتين . ويمكن تركيز كل من الملفات الإبتدائية والثانوية ، فى حالة الملفات الأسطوانية ، فى ملف اسطوانى واحد ، كما هو مبين فى الشكل ، كما يمكن تكوين كل منها من اسطوانتين ، يتناوب وضعها جميعا على القلب الحديدى ، بحيث يأتى دائما أولا ، من ناحية الحديد ، بسبب دواعى العزل عنه ، ملف ضغط منخفض . هذا وتتحكم طريقة تقسيم الملفات وتشكيلها ، فى ممانعة التسرب المرحلية المحول ، كما سوف يتضح فى باب التصميم فيما بعد . وتختلف قيمة هذه الممانعة فى حالة الملفات الاسطوانية عنها فى حالة الملفات القرصية . ويراعى بالنسبة لقيمة هذه الممانعة أيضا ، ودواعى العزل عن الحديد ، أن يوضع نصف قرص من ملفات الضغط المنخفض عند الطرفين ، أى أعلا وأسفل الملفات ، عند استخدام الملفات القرصية ، ويفضل ، فى حالة الملفات الاسطوانية عادة ، تقسيم ملف الضغط المنخفض إلى اسطوانتين ، توضع بداخلهما اسطوانة الضغط العالى ، حيث يؤدى

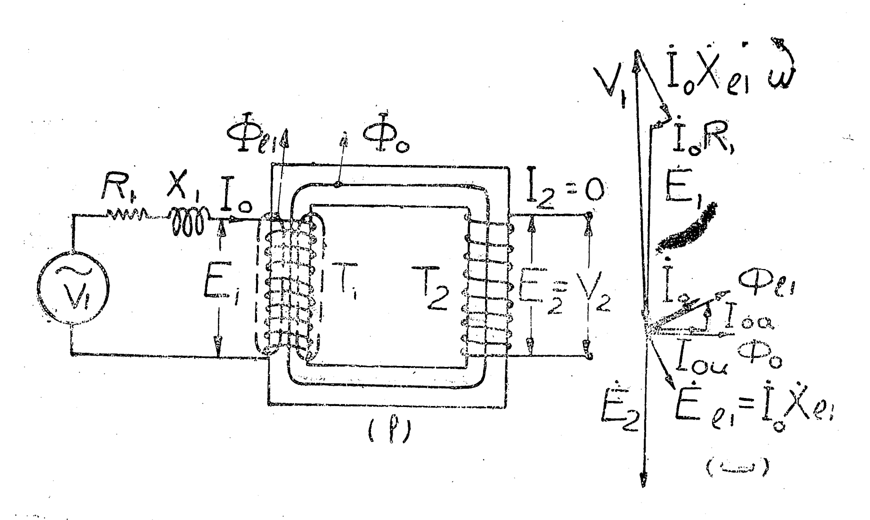
هذا الترتيب إلى خفض قيمة ممانعة التسرب ، وخفض إرتفاع المحول كذلك .

نوضح فيما يلي كيفية ترتيب الملفات الاسطوانية (ملفين كاملين) على الساق الحديدى . يوضع ملف الضغط المنخفض فوق اسطوانة من الورق المقوى لكي تعزله عن الساق (ويمكن في بعض الحالات الإستغناء عن هذه الإسطوانة والإكتفاء بالعازل فوق اللفات) . يترك بعد ذلك حيز اسطوانى للتبريد (يمتلىء بالزيت) ، ثم اسطوانة (أو أكثر) من البكاليت أو الورق المقوى (أو أى مادة أخرى عازلة) ، يوضع فوقها ملف الضغط العالى ، الذى ينقسم إلى قطاعات ، بحيث لا يزيد ضغط اللفات في كل قطاع منها عن 1000 فولت .

مخطط متجهات المحول بدون حمل :

(Vector diagram of transformer on no load)

يبين شكل (٦ — ٧ أ) ملفى محول أحادى المرحلة (أو ما يكافىء مرحلة فى محول ثلاثى المراحل) . ويوصل الملف الإبتدائى إلى الينبوع ، فى حين يترك



شكل (٦ — ٧)

الملف الثانوى مفتوحا (open circuited secondary) ، بحيث لايمر فيه أى تيار . فاذا كان ملف الضغط العالى هو المتصل بالينبوع ، يكون المحول لخفض الضغط (step down rransformer) ، أما إذا كان ملف الضغط المنخفض هو المتصل بالينبوع ، يكون المحول لرفع الضغط (step up transformer) . وفى كلتا الحالتين يمر من الينبوع تيار اللاحمل الإبتدائى (primary no load current) I_o فى الملف الإبتدائى ، فى حين يظل الملف الثانوى بدون تيار. هذا وتتحدد قيمة I_o ، ووضعه المرحلى بالنسبة لضغط الينبوع V_1 على النحو التالى :

أولا — ينشأ فى القلب الحديدى ، نتيجة لمرور التيار المتردد I_o فى الملف الإبتدائى ، فيض مغناطيسى متردد ، ينقسم إلى قسمين ، هما ϕ_o ، ϕ_{l1} . يكون ϕ_o متشابكا ، على قدم المساواة ، مع جميع لفات الملف الإبتدائى T_1 ، وكذلك مع جميع لفات الملف الثانوى T_2 ، بينما يكون ϕ_{l1} متشابكا مع لفات الملف الإبتدائى فقط . لذلك ينتج عن ϕ_o توليد قوة دافعة كهربية مضادة E_1 فى الملف الابتدائى ، وقوة دافعة كهربية E_2 فى الملف الثانوى ، يكونان فى اتفاق مرحلى ، وتساوى النسبة بينهما $\frac{E_1}{E_2}$ نفس النسبة بين عدد لفات الملفين $\frac{T_1}{T_2}$. أما ϕ_{l1} فينتج عنه ، حسب قانون لنز ، توليد قوة دافعة كهربية مضادة E_{l1} ، فى الملف الابتدائى ، يمكن اعتبارها مكافئة لهبوط الضغط $I_o X_1$ ، الناشىء عن مرور التيار I_o فى ممانعة التسرب للملف الابتدائى X_1 أوم (وهى التى نحصل عليها من حساب معامل الحث الذاتى لهذا الملف بسبب تشابك ϕ_{l1} معه) ، التى سوف نعتبرها ثابتة القيمة ، مهما اختلفت قيمة التيار . ($X_1 = X_{l1}$)

ويكون اعتبار أن X_1 ثابتة القيمة صحيحا ، مهما اختلفت قيمة التيار ، على أساس أن مسار الخطوط ϕ_{l1} يظل غير مشبع بالخطوط المغناطيسية ، مهما

بلغت قيمة التيار . وهذا محتمل التحقيق ، بالنسبة لأى فيض مغناطيسى متسرب فى المحول ، سواء فى الملف الابتدائى ، أو فى الملف الثانوى ، لأن الجزء الرئيسى من مسار مثل هذا الفيض يكون عادة فى الهواء . لذلك يمكننا اعتبار أن قيمة الفيض المتسرب تتناسب مع قيمة التيار ، فيكون $\phi_{l1} = C_{l1} I_1$ ، $\phi_{l2} = C_{l2} I_2$ ويكون معامل الحث الذاتى L ، الذى تحسب على أساسه قيمة ممانعة التسرب X_1 ، ($X_1 = 2 \pi f L$) (هندسة الآلات الكهربية صفحة ١٠٥ ، ١٠٦) عبارة عن :

$$X_1 = \frac{T_1 \phi_{l1} \times 10^{-8}}{I_1} = C_{l1} T_1 \times 10^{-8} \quad ,$$

$$X_2 = \frac{T_2 \phi_{l2} \times 10^{-8}}{I_2} = C_{l2} T_2 \times 10^{-8}$$

أما قيمة القوة الدافعة الكهربية المضادة ، التى تنشأ فى الملف نتيجة لوجود الفيض المتسرب متشابكا معه ، فنجد أنها عبارة عن :

$$E_{l1} = - T_1 \frac{d \phi_{l2}}{dt} \times 10^{-8} \quad ,$$

$$E_{l2} = - T_2 \frac{d \phi_{l2}}{dt} \times 10^{-8}$$

أى أنها تتناسب مع قيمة التيار . وبذلك نستطيع اعتبار أن :

$$E_{l1} = I_1 X_1 \quad , \quad E_{l2} = I_2 X_2$$

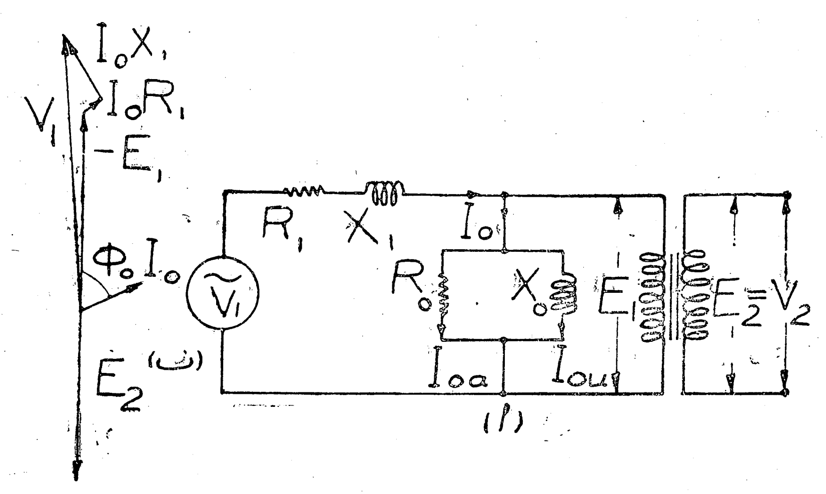
ويكون اتجاه E_l عموديا على اتجاه التيار المناظر ، بالضبط على أساس أنها عبارة عن هبوط الضغط فى الممانعة X_1 الناشىء عن مرور هذا التيار فيها .

كذلك يتسبب عن مرور التيار I_o فى الملف الابتدائى حدوث هبوط ضغط

مقداره $I_o R_1$ ، حيث R_1 هى مقاومة الملف الإبتدائى بالاوم . هذا ويجب أن يتعادل الضغط $\dot{V}_1$ مع مجموع كل من $\dot{E}_1$, $\dot{I}_o X_1$, $\dot{I}_o R_1$ ، باعتبارها جميعا متجهات ، أو على حسب قانون كيرشوف الأول يجب أن يكون :

$$\dot{V}_1 + \dot{I}_o R_1 + \dot{I}_o \dot{X}_1 + \dot{E}_1 = 0 \quad . \quad . \quad (١ — ٧)$$

يبين شكل (٦ — ٧ ب) مخطط متجهات المحول بدون حمل ، وتظهر متجهات المعادلة (١) ، بأوضاعها المرحلية التى تحقق هذه المعادلة . ويلاحظ أننا شطرنا التيار I_o إلى مركبتين ، إحداهما I_{ou} عبارة عن تيار المغطسة (magnetising current) ، الذى ينشىء ϕ_o ، ويكون لذلك فى اتفاق مرحلى معه ، ومتقدما بزاوية مرحلية مقدارها 90 درجة عن $\dot{E}_1$ (وكذلك E_2) ، والثانية هى I_{oa} عبارة عن تيار المفقودات الحديدية (iron loss current) ، الذى يحمل معه القدرة اللازمة لتغطية المفقودات الحديدية فى حديد المحول ، وهى التى سوف نرمز اليها بالرمز P_{VFe} . يبين شكل (٧ — ٧ أ) الدائرة المكافئة للمحول ، التى تأخذ جميع الحقائق ، السابق ذكرها ، فى الاعتبار ، حيث R_o هى مقاومة مكافئة لحساب المفقودات الحديدية بالعلاقة $P_{VFe} = I^2_{oa} R_o$ ، كما أن X_o هى ممانعة التمغطس (magnetisiug reactance) المكافئة ، لحساب القوة الدافعة الكهربية المضادة بالعلاقة $E_1 = I_{ou} X_o$. ويلاحظ أن فصل ϕ_o عن ϕ_{l1} قد أدى إلى إعتبار ممانعتين منفصلتين ، هما X_o و X_1 ، وقد كان من الممكن اعتبارهما معا ممانعة واحدة ، يمكن حسابها من قيمة معامل الحث الذاتى المكافىء لتأثير ϕ_o ، ϕ_{l1} معا . ولكننا سوف نستفيد من الأوضاع على هذا النحو فى تحليلاتنا المقبلة . ذلك لأن ϕ_o المتشابك تشابكا تاما مع كل من T_1 , T_2 ، يعنى أن معامل



شكل (٧ — ٧)

الازدواج بين الملفين ، المبينين فى الدائرة المكافئة فى شكل (٧—٧) ، يساوى الوحدة ، وهو ما يجعل حسابات الملف الثانوى أكثر سهولة ، عند تحميل المحول .

تجد فى شكل (٧—٧ب) نفس مخطط المتجهات المبين فى شكل (٦—٧ب) ، ولكن بالاتجاهات المضادة لكل من $\dot{I}_o\dot{X}_1$, $\dot{I}_o R_1$, $\dot{E}_1$ ، وهذا يعنى أنها أصبحت تمثل فى شكل (٧—٧ب) مركبات الضغط V_1 ، اللازمة للتغلب على كل من $\dot{I}_o\dot{X}_1$, $\dot{I}_o R_1$, $\dot{E}_1$ ، بعد أن كانت تمثل نفس هذه المتجهات بمسمياتها الأصلية فى شكل (٦—٧ب) ($\dot{E}_1$ هى القوة الدافعة الكهربية المضادة التى يولدها فى الملف الابتدائى ، فهى متخلفة 90° عن $\dot{I}_{ou}$ ، و $\dot{I}_o R_1$ هبوط الضغط فى ϕ_o مقاومة الملف الابتدائى ، فهو فى عكس إتجاه $\dot{I}_o$ ، و $\dot{I}_o\dot{X}_1$ هبوط الضغط فى المانعة $\dot{X}_1$ ، فهو متخلف عن $\dot{I}_o$ بزاوية 90° . وكل ذلك كما فى شكل (٦—٧ ب)) .

نفرض أن القيمة اللحظيــة ϕ_o للفيض بالنسبة لقيمة كل من E_1 ، E_2 المغناطيسى المتبادل (mutual flux) تتغير عــلى منحنى جيبى بحيث يكون $\phi_o = \phi_m \cos \omega t$ ، حيث ϕ_m هى قيمة النهاية العظمى للفيض المتبادل فى القلب الحديدى بالخطوط . معنى أن القيمة اللحظية للقوة الدافعة الكهربية e_t المتولدة فى كل لفة على القلب الحديدى ، سواء كانت هذه اللفة فى الملف الابتدائى أو الملف الثانوى ، تكون هى الأخرى متغيره على منحنى جيبى بالصورة $e = E_{tm} \sin \omega t$ حيث E_{tm} هى قيمة النهاية العظمى للقوة الدافعة الكهربية المتولدة فى اللفة الواحدة وقيمتها $\omega\phi \times 10^{-8}$ فولت . وبذلك نجد أن القيمة الفعالة للضغط المتولد فى كل لفة E_t بالفولت هى :

$$E = 2\pi f \phi_m \times \frac{10^{-8}}{\sqrt{2}} = 4.44 \phi_m f \times 10^{-8} \quad \ldots\ldots \quad (٢-٧)$$

ومن ثم نجد أن قيمة كل من E_1 و E_2 هى :

$$\left.\begin{array}{l} E_1 = 4.44 \phi_m T_1 f \times 10^{-8} \\ E_2 = 4.44 \phi_m T_2 f \times 10^{-8} \end{array}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٣-٧)$$

وعندما يكون المحول بدون حمل فان $V_1 \cong E_1$ ، كما أن $V_2 = E_2$ بحيث يمكننا أن نعتبر أن :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{T_1}{T_2} \cong \frac{V_1}{V_2} \quad \ldots \quad (\text{المحول بدون حمل}) \quad (٤-٧)$$

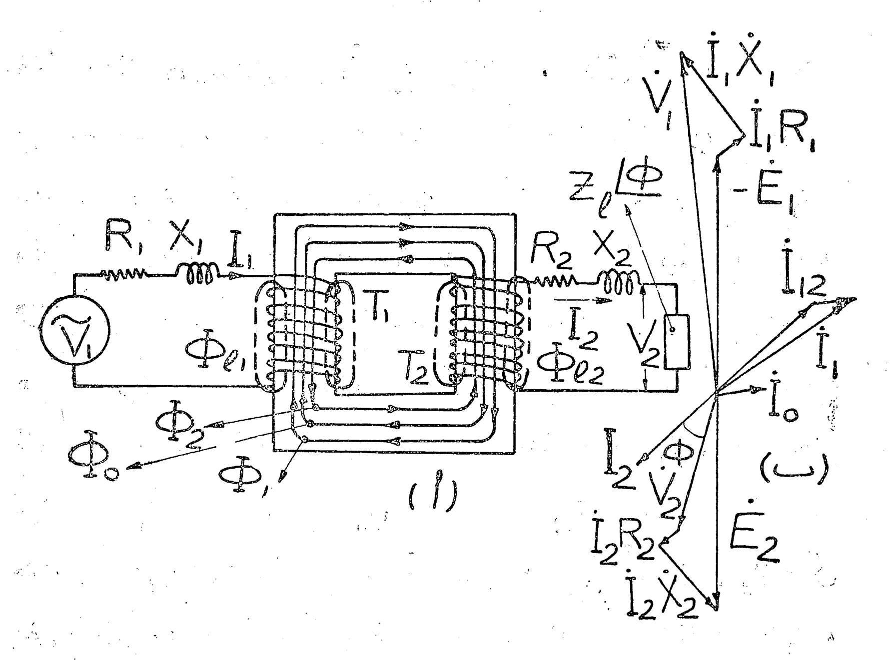
ونظرا لان قدرة المدخل تساوى المفقودات الحديدية والنحاسية فى المحول ، لان قدرة المخرج تساوى صفرا ، ونظرا لصغر قيمة التيار الابتدائى ، وعدم وجود تيار في الملف الثانوى ، فاننا نستطيع اهمال المفقودات النحاسية ، في هذه

الحالة ، ونعتبر أن قدرة المدخل المحول ، وهو بدون حمل ، تساوى المفقودات الحديدية على وجه التقريب .

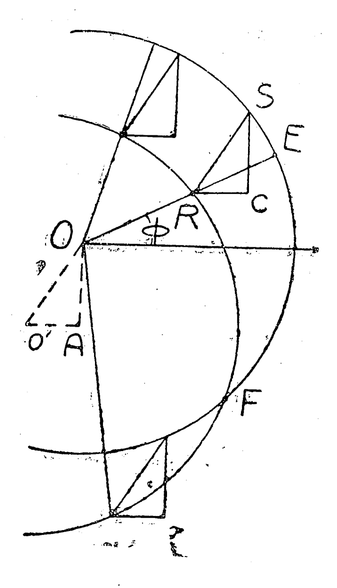
مخطط متجهات المحول بالحمل :

(**Vector diagram of transformer on load**)

إذا وضع حمل على المحول ، يتمثل فى توصيل معاوقة معينة $\dot{Z}_l$ بين طرفى الملف الثانوى ، بحيث يمر تيار الحمل I_2 فى هذا الملف ، ينشأ نتيجة لذلك فيض مغناطيسى فى القلب الحديدى تتوقف قيمته على I_2 . ويمكن تقسيم هذا الفيض إلى جزئين ، كما هو مبين فى شكل (٨—٧ أ) ، الجزء ϕ_2 ، المتشابك تمام التشابك مع كل اللفات فى الملفين T_1 , T_2 ، والجزء ϕ_{l2} ،المتشابك مع T_2



شكل (٨—٧)



شكل (٨ — ٧)

فقط . ويمثل ϕ_2 رد فعل تيار الحمل I_2 على الملف الابتدائى الذى أنشأه ، وهو على حسب قانون لنز يكون فى إتجاه مضاد تماما لاتجاه الفيض ϕ_o ، الذى كان سببا فى وجوده . ولكن نظرا لأن ϕ_o مرتبط بضغط الينبوع الثابت V_1 ، ولايتأثر إلا بالتأثير فى قيمة هذا الضغط ، فان الينبوع يتجاوب مع رد الفعل الناشيء عن وجود التيار I_2 ، فى الملف الثانوى ، بالفعل المضاد له ، وهو عبارة عن التيار I_{12} ، الذى يمر فى الملف الابتدائى ، لكى يعطى فى الدائرة المغناطيسية المحول ، وهى القلب الحديدى ، فيضا مساويا ومضادا للفيض ϕ_2 ، وذلك حتى لايؤثر هذا الأخير أى تأثير على ϕ_o . ويلاحظ أن I_{12} لايمكن أن يعطى فيضا متبادلا فقط ϕ_1 ، يكون متشابكا على قدم المساواة مع كل من T_1 و T_2 ، لكى يلغى تأثير ϕ_2 ، وإنما لابد أن يعطى إلى جانب ذلك فيضا متشابكا مع T_1 ، بحيث نحصل على زيادة كبيرة فى الفيض المتشابك مع T_1 وهو ϕ_{11} ، فقط

الذى كان موجودا عندما كان المحول بدون حمل . وتتناسب هذه الزيادة فى ϕ_{11} مع الزيادة فى تيار الملف الابتدائى من I_o إلى I_1 ، الناتج من مجموع I_o ، I_{12} .

يمثل ϕ_{11} فيضا متسربا بالنسبة للملف الابتدائى ، كما يمثل ϕ_{12} فيضا متسربا بالنسبة للملف الثانوى . ويعطى ϕ_{11} قوة دافعة كهربية مضادة ، يمكن الإستعاضة عنها بهبوط الضغط $I_1 X_1$ ، فى الملف الابتدائى ، حيث تكون X_1 هى ممانعة التسرب لهذا الملف ، المحسوبة بمعامل الحث الذاتى الناشىء عن فعل ϕ_{11} ، مع وجود التيار I_1 ، فى الملفات T_1 . كما يعطى ϕ_{12} قوة دافعة كهربية مضادة ، يمكن الاستعاضة عنها بهبوط الضغط $I_2 X_2$ ، فى الملف الثانوى ، حيث X_2 هى ممانعة التسرب لهذا الملف ، المحسوبة بمعامل الحث الذاتى الناشىء عن ϕ_{12} ، مع وجود التيار I_2 فى اللفات T_2 . هذا ويمكن اعتبار أن X_1 ، X_2 ثابتتان فى القيمة .

ونظرا لأن كل من ϕ_1 و ϕ_2 يمر فى نفس الدائرة المغناطيسية ، وهى القلب الحديدى ، ويقابل نفس المعاوقة المغناطيسية ، بناء على ذلك ، فان تساوى ϕ_1 مع ϕ_2 يستلزم أن تكون القوة الدافعة المغناطيسية ، التى أنشأت أحدهما ، تساوى القوة الدافعة المغناطيسية ، التى أنشأت الآخر . وهذا يعنى ضرورة تساوى $I_{12}T_1$ مع $I_2 T_2$ ، فيكون

$$\frac{I_{12}}{I_2} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{E_2}{E_1} \quad \text{.............. (٥—٧)}$$

هذا ونظرا لأن I_o يكون صغيرا جدا بالنسبة لكل من I_{21} ، I_1 ، فانه يمكن دائما اعتبار أن قيمة التيار I_{12} تساوى قيمة التيار I_1 تقريبا ، بحيث يمكننا أن نعتبر أن :

$$\frac{I_1}{I_2} \cong \frac{T_2}{T_1} \quad , \quad I_{12} \cong I_1 \quad \cdots \quad \cdots \quad (٥-٧\text{أ})$$

يبين شكل(٨-٧ب)مخطط المتجهات ، مع وجود الحمل على المحول . ويمكن تتبع المتجهات فى هذا الشكل ، على هدى ما سبق شرحه ، على النحو التالى : $\dot{V}_2$ هو متجه الضغط على طرفى الملف الثانوى عند وجود الحمل ، الذى يجمع على $\dot{I}_2\,R_2$ ، مركبة القوة الدافعة الكهربية للتغلب على هبوط الضغط فى مقاومة الملف الثانوى R_2 ، وعلى $\dot{I}_2\,\dot{X}_2$ ، مركبة القوة الدافعة الكهربية للتغلب على هبوط الضغط فى ممانعة التسرب للملف الثانوى X_2 ، فنحصل على القوة الدافعة الكهربية $\dot{E}_2$. هذا فى الوقت الذى يكون فيه تيار الحمل فى الملف الثانوى ممثلا بالمتجه $\dot{I}_2$ الذى يصنع الزاوية ϕ مع $\dot{V}_2$ ، وهى زاوية الاختلاف المرحلى بينهما ، التى تتحدد بناء على طبيعة معاوقة الحمل $\dot{Z}_l$. متجه التيار $\dot{I}_{12}$ يكون فى عكس إتجاه $\dot{I}_2$ تماما ، وتتحدد قيمته بالنسبة لقيمة $\dot{I}_2$ من المعادلة (٥-٧) . بجمع $\dot{I}_{12}$ مع $\dot{I}_o$ نحصل على متجه التيار فى الملف الابتدائى $\dot{I}_1$ ، الذى يتحدد بناء على وجوده كل من $\dot{I}_1\,R_1$ (مركبة الضغط $\dot{V}_1$ ، اللازمة لمعادلة هبوط الضغط ، الناشىء عن مرور التيار $\dot{I}_1$ ، فى مقاومة الملف الابتدائى R_1) و $\dot{I}_1\,\dot{X}_1$ (مركبة الضغط $\dot{V}_1$ ، اللازمة لمعادلة هبوط الضغط الناشىء عن مرور التيار $\dot{I}_1$ فى ممانعة التسرب للملف الابتدائى X_1) ، وكذلك $\dot{V}_1$.

الدائرة المكافئة للمحول :

(The equivalent circuit of the transformer)

بمراجعة الأشكال السابقة نجد أننا ، لكي نقوم برسم مخطط المتجهات للمحول أو عمل أية تحليلات أخرى ، نحتاج إلى رسم الدائرة الكهربية ، التي تمثل الملفات. وهي تتكون من جزءين ، جزء يمثل الملف الابتـــدائي ، وجزء يمثل الملف الثانوي ، وهما غير متصلين ، ويجب أن ننتقل من أحدهما إلى الآخر ، عن طريق المجال المغناطيسي في القلب الحديدي ، الذي يربط بينهما . ولكي يكون تنـــاول الامور أكثر بساطة وسهولة ، نحتاج في الحقيقة إلى دائرة واحدة متصلة ، يغذي الينبوع أحد طرفيها ، ويوضع الحمل على طرفها الآخر . يطلق عـلى مثل هـذه الدائرة اسم الدائرة المكافئة للمحـول ، ويجب أن يراعى في اعدادهـا أن تعطي نفس النتائج لخواص التشغيل الأساسية للمحول ، وأهمهـا ، بالنسبة لحكمنا على صلاحية المحول لأداء مهمة معينة ، معامل التنظيم ومعامل الجودة . لذلك نسير ، في سبيل الحصول على هذه الدائرة المكافئة على النحو التالي :

إن أول مانهدف اليه في الدائرة المكافئة أن تكون متصلة . وهـذا لا يتأتى إلا بجعل القوة الدافعة الكهربية في الملف الثانوي مساوية للقوة الدافعة الكهربية للملف الابتدائي ، بحيث يمكن ، بنـاء على ذلك ، إلغـاء هذين الملفين ، ووصل الدائرة عند موضعهما ، إستناداً إلى تساوي الضغط عند نقطتي الاتصال ، الأمر الذي لا يؤثر أي تأثير على الخواص الكهربية للدائرة ، كما هو معروف . لذلك نفترض أن عدد لفات الملف الثانوي قد أصبحت T'_2 بدلاً من T_2 ، بحيث تساوي T'_2 عدد لفات الملف الابتدائي T_1 ، لكي تعطينا القوة الدافعة الكهربية الثانوية E'_2 التي تساوي E_1 . ويقال في هذه الحالة إننا ننسب (refer) الملف الثـانوي إلى الملف الابتدائي . ويمكن أن يحدث العكس بطبيعة الحال ، حيث نفترض أن عدد لفات الملف الابتدائي قد أصبحت T'_1 ، التي تساوي T_2 ، فنحصل عـلى القوة

الدافعة الكهربية E'_1 فى الملف الابتدائى تساوى E_2 . وبذلك نحصل على الملف الابتدائى منسوبا إلى الملف الثانوى (primary winding referred to secondary side) . ويجب ، فى كلتا الحالتين ، ألا تتغير قيمة كل من معامل التنظيم ومعامل الجودة للمحول ، وهذا يستلزم أن يتوفر الشرطان الآتيان :

أولا — لكى لا تتغير قيمة معامل الجودة يجب أن تتساوى قيمة المفقودات النحاسية فى الملف الأصلى والملف المنسوب . فاذا أشرنا إلى الكميات المنسوبة ، بالكميات الأصلية وعليها شرطة ، نجد أنه :

١ — عندما يكون الملف الثانوى منسوبا إلى الملف الابتدائى :

$$I'^2_2 \; R'_2 = I^2_2 \; R_2 \quad ,$$

$$R'_2 = R_2 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 = R_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2$$

٢ — عندما يكون الملف الابتدائى منسوبا إلى الملف الثانوى :

$$I'^2_1 \; R'_1 = I^2_1 \; R_1 \quad ,$$

$$R'_1 = R_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^2 = R_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2$$

ثانيا — لكى لا تتغير قيمة معامل التنظيم يجب تساوى قيمة هبوط الضغط النسبى ، فى كل من المقاومة ومانعة التسرب ، بالنسبة لكل من الملفين الأصلى والمنسوب . وإن ماجاء فى أولا يفى أيضا بشرط تساوى هبوط الضغط النسبى فى المقاومتين ، الأصلية والمنسوبة . أما بالنسبة لتساوى هبوط الضغط فى المانعتين ، الأصلية والمنسوبة ، نجد أن :

١ — عندما يكون الملف الثانوى منسوبا إلى الملف الابتدائى :

$$\frac{I_2 X_2}{V_2} = \frac{I'_2 X'_2}{V'_2} \quad ,$$

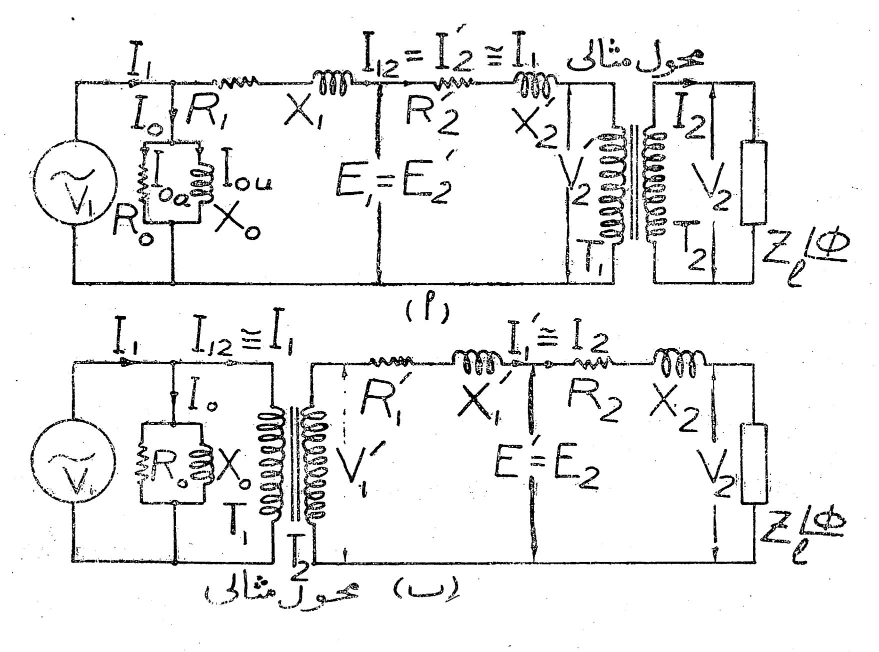
$$X'_2 = X_2 \left(\frac{V'_2}{V_2} \right) \left(\frac{I_2}{I'_2} \right) = X_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2$$

٢ — عندما يكون الملف الابتدائى منسوبا إلى الملف الثانوى :

$$\frac{I_1 X_1}{V_1} = \frac{I'_1 X'_1}{V'_1} \quad ,$$

$$X'_1 = X_1 \left(\frac{V'_1}{V_1} \right) \left(\frac{I_1}{I'_1} \right) = X_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2$$

هذا ولكى يتم تبسيط الدائرة المكافئة ، التى حصلنا عليها بالطريقة السابقة ، حتى يتيسر استخدامها فى انجاز الحسابات الخاصة بالمحول دون تعقيد ، مع



شكل (٩ — ٢)

الحصول على نتائج ذات تقريب مقبول ، فاننا ننقل معاوقة التمغطس (magnetising impedance) من وضعها الأصلى ، على طرفى الملف الابتدائى ، كما هو مبين فى شكلى (٧ — ٧) ، (٨ — ٧) ، إلى الموضع التقريبى على طرفى الينبوع ، كما هو مبين فى شكل (٩ — ٧) ، فى الدائرة المكافئة ، التى سوف نستخدمها فى تحليلاتنا المقبلة . ونجد أن التقريب فى هذه الدائرة ينحصر فى أمرين ، يمكن التجاوز عنهما ، وهما :

أولا — أن الضغط على معاوقة التمغطس قد أصبح V_1 بدلا من E_1 ، ونظراً لأن V_1 تكون قريبة جدا من E_1 ، فى القيمة والاختلاف المرحلى ، فان الخطأ الناشىء عن هذا التقريب على كل من I_{ou} و I_{oa} لايكون له أثر يذكر على النتائج النهائية المطلوبة .

ثانيا — أن التيار المار فى كل من R_1 و X_1 قد أصبح I_{12} بدلا من I_1 . ونظراً لأننا نستطيع إعتبار I_{12} مساويا I_1 ، لأن I_o يكون عادة نسبة صغيرة جدا من I_1 (يجب ألا تزيد عن % 10) ، فاننا نستطيع الافادة من هذا التقريب ، دون الخوف من أن يكون له تأثير ملحوظ على النتائج المطلوبة .

يبين شكل (٩ — ٧) الدائرة المكافئة للمحول ، التى يمكننا أن نستخدمها فى جميع الحسابات الخاصة بالمحول بعد ذلك . نجد فى أ من هذا الشكل الدائرة المكافئة منسوبة إلى الملف الابتدائى (Equivalent circuit referred to primary side) وتكون ثوابتها هى :

$$R_1 \quad , \quad X_1 \quad , \quad Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$$

$$R'_2 = R_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 \quad ,$$

$$X'_2 = X_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 \quad ,$$

$$Z'_2 = Z_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 = \sqrt{R'^2_2 + X'^2_2}$$

$$R_{1eq} = R_1 + R'_2 \quad , \quad X_{1eq} = X_1 + X'_2 \quad ,$$

$$Z_{1eq} = \sqrt{R_{1eq}^2 + X_{1eq}^2}$$

$$V'_2 = V_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \quad ,$$

$$I'_2 = I_1 = I_2 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \cdots\cdots \text{(٧—٦)}$$

ونجد فى ب من شكل (٩ — ٧) الدائرة المكافئة المحول منسوبة إلى الملف الثـــانوى (Equivalent circuit referred to secondary side) ، وتكـــون ثوابتها هى :

$$R_2 \quad , \quad X_2 \quad , \quad Z_2 = \sqrt{R^2_2 + X^2_2}$$

$$R'_1 = R_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 \quad ,$$

$$X'_1 = X_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 \quad ,$$

$$Z'_1 = Z_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 = \sqrt{R'^2_1 + X'^2_1}$$

$$R_{2eq} = R_2 + R'_1 \quad ; \quad X_{2eq} = X_2 + X'_1 \quad ,$$

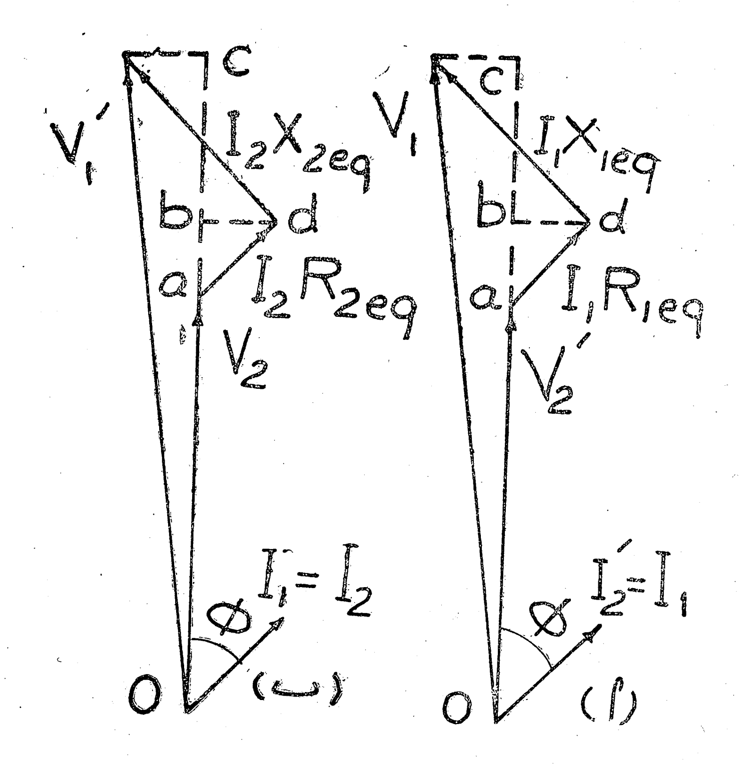
$$Z_{2eq} = \sqrt{R_{2eq}^2 + X_{2eq}^2}$$

$$V'_1 = V_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad ,$$

$$I'_1 = I_2 = I_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \quad \ldots\ldots (٧-٧)$$

معامل التنظيم للمحول : (Regulation of the transformer)

يبين شكل (١٠ — ٧ أ) مخطط المتجهات للمحول على أساس الدائرة المكافئة المبينة فى شكل (٩ - ٧ أ)، كما أن مخطط المتجهـــات فى شكل (١٠ — ٧ب) مرسوم على أساس الدائرة المكافئة فى شكل (٩ — ٧ب) .



شكل (١٠ — ٧)

يتضح من شكل (٩ — ٧ أ) أن ضغط الينبوع V_1 يدخل المحول المثالى بالقيمة V'_2 ، بعد احتساب جميع هبوطات الضغط للمحول باستخدام الدائرة المكافئة ، ويخرج من المحول المثالى إلى طرفى الحمل مباشرة بالقيمة V_2 ، فيكون معامل التنظيم ، على أساس نفس التعريف الذى أوردناه فى الباب الرابع ، بالنسبة للمولدات ، هو :

$$\varepsilon = \frac{V_1 - V'_2}{V_1} \quad , \quad \varepsilon\,\% = \frac{V_1 - V'_2}{V_1} \times 100 \quad (٧—٨)$$

ويتضح من شكل (٩ — ٧ب) أن ضغط الينبوع V_1 يدخل المحول المثالى مباشرة ، ويخرج منه بالقيمة V'_1 ، وبعد احتساب جميع هبوطات الضغط للمحول باستخدام الدائرة المكافئة ، يصبح الضغط على طرفى الحمل V_2 ، فيكون معامل التنظيم ، على هذا الأساس ، هو :

$$\varepsilon = \frac{V'_1 - V_2}{V'_1} \quad , \quad \varepsilon\,\% = \frac{V'_1 - V_2}{V'_1} \times 100 \quad (٧—٩)$$

بالرجوع إلى شكل (١٠ — ٧ أ) ، نجد أن :

$$V_1 \simeq OC \simeq Oa + ab + bC \simeq V'_2 + I_1 R_{1eq} \cos\phi + I_1 X_{1eq} \sin\phi$$

$$\therefore \quad V_1 - V'_2 \simeq I_1 R_{1eq} \cos\phi + I_1 X_{1eq} \sin\phi$$

$$\therefore \quad \varepsilon \simeq \frac{I_1 R_{1eq} \cos\phi + I_1 X_{1eq} \sin\phi}{V_1} \quad \ldots \quad (٧—١٠)$$

بالرجوع إلى شكل (١٠ — ٧ب) ، نجد أن :

$$V'_1 \simeq OC \simeq Oa + ab + bC \simeq V_2 + I_2 R_{2eq} \cos\phi + I_2 X_{2eq} \sin\phi$$

$$\therefore \quad V'_1 \quad V_2 \simeq I_2 R_{2eq} \cos\phi + I_2 X_{2eq} \sin\phi$$

$$\therefore \quad \varepsilon \cong \frac{I_2 R_{2eq} \cos\phi + I_2 X_{2eq} \sin\phi}{V_1'} \quad \ldots \quad (\text{٧}-\text{١١})$$

تستخدم أى من المعادلتين (١٠ — ٧) أو (١١ — ٧) لحساب معامل التنظيم للمحول، باستخدام ثوابته، وتيار الحمل ومعامل قدرته، منسوبة إلى الملف الابتدائى، أو الملف الثانوى. هذا ويمكن الحصول على هذه الثوابت باجراء اختبارى اللاحمل، ودائرة القصر على المحول. ويمكن فى هذه الحالة أيضا الحصول على المعلومات اللازمة لحساب معامل جودة المحول، كما سوف يتضح حالا.

ومن الواضح أن كلا من المعادلتين (١٠ — ٧)، (١١ — ٧) تقريبيتان، ولكن نظرا لأن تصميم المحول يتم عادة على أساس أن هبوط الضغط عند الحمل الكامل، وبالتالى معامل التنظيم، يكون صغيرا جدا (لا يكاد يصل إلى 10 %)، فاننا نحصل من هاتين المعادلتين على نتائج مرضية للغاية، تفى باحتياجاتنا العملية، وذلك نظرا لأن الزاوية بين V_1 و V'_2 (أو بين V'_1 و V_2) تكون صغيرة جدا.

وعلى العموم يمكننا الحصول على القيم الأصلية بدون تقريب على النحو التالى :

أولا — إذا كان V_2 معلوما (أو V'_2)، والمطلوب الحصول على V'_1 (أو V_1) نجد، بالرجوع إلى شكلى (١٠ — ٧ أ، ب) أن :

$$V'_1 = \sqrt{(V_2 \cos\phi + I_2 R_{2eq})^2 + (V_2 \sin\phi + I_2 X_{2eq})^2}$$

$$V_1 = \sqrt{(V'_2 \cos\phi + I_1 R_{1eq})^2 + (V'_2 \sin\phi + I_1 X_{1eq})^2} \quad (\text{١١}-\text{٧أ})$$

ويمكن بتطبيق المعادلتين (٨ — ٧)، (٩ — ٧) بعد ذلك الحصول على معامل التنظيم. ثانيا — أما إذا كان المطلوب وضع حمل معين، بمعامل قدرة معين، على المحول، عندما يكون موصلا إلى ينبوع ذى ضغط ثابت معين V_1 (أو V'_1)، ثم تعيين معامل التنظيم، أو بمعنى أصح تعيين الضغط على طرفى الحمل،

V'_2 (أو V_2) . فاننا نستفيد بالمعادلتين (٧ — ٤) ، (٨ — ٤) ، اللتين سبق استنباطها للحالة المماثلة فى المولد المتزامن ، فى الباب الرابع ، حيث نجد أن V_1 (أو V'_1) هنا تناظر E_o هناك ، وأن V'_2 (أو V_2) هنا تناظر V هناك ، بينما تأخذ R_{1eq} (أو R_{2eq}) هنا مكان R_a هناك، وتأخذ X_{1eq} (أو X_{2eq}) هنا مكان X_s هناك ، ويظل نفس المعنى لمركبتى الحمل P و Q ساريا ، وكذلك معامل قدرة الحمل $\cos\phi$. وعلى هذا الأساس نجد أن :

$$a\,(V^2_2)^2 + b\,V^2_2 + C = 0$$

$$a'\,(V'^2_2)^2 + b'\,V'^2_2 + C' = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (\text{١١ — ٧ ح})$$

$$a = 1 \qquad , \qquad a' = 1$$

$$b = -\left[V'^2_1 - 2\,(PR_{2eq} + QX_{2eq}) \right]$$

$$b' = -\left[V_1^2 - 2\,(PR_{1eq} + QX_{1eq}) \right]$$

$$C = (R^2_{2eq} + X^2_{2eq}) \left(\frac{P}{\cos\phi}\right)^2 = Z^2_{2eq} \left(\frac{P}{\cos\phi}\right)^2$$

$$C' = (R^2_{1eq} + X^2_{1eq}) \left(\frac{P}{\cos\phi}\right)^2 = Z^2_{1eq} \left(\frac{P}{\cos\phi}\right)^2$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4C}}{2}} = \sqrt{\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4C}}{2}}$$

$$V'_2 = \sqrt{\frac{-b' \pm \sqrt{b'^2 - 4C'}}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{-b' + \sqrt{b'^2 - 4C'}}{2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (\text{١١ — ٧ د})$$

مخطط كاب لحساب معامل التنظيم : (Kapp's regulation diagram)

يستخدم هذا المخطط للحصول على القيم المختلفة لمعامل التنظيم، عندما يظل تيار الحمل ذا قيمة ثابتة بدون تغيير، ويتغير مع ذلك معامل القدرة . يبين شكل (٨ — ٧ حـ) ص ٣٤٤ مخطط كاب وطريقة رسمه، على أساس أن ضغط الينبوع V_1 (أو V'_1) ثابتا، ويكون التغيير فى V'_2 (أو V_2) ناشئا عن تغيير قيمة معامل القدرة، مع ثبوت قيمة تيار الحمل . O هو مركز الدائرة التى نصف قطرها OE أو OS وهو يمثل الضغط الثابت V_1 (أو V'_1) . المثلث RCS فيه RC يمثل $I_1 R_{1eq}$ (أو $I_2 R_{2eq}$)، SC يمثل $I_1 X_{1eq}$ (أو $I_2 X_{2eq}$) و RS يمثل $I_1 Z_{1eq}$ (أو $I_2 Z_{2eq}$) . عندما يتحرك هذا المثلث موازيا لنفسه، بسبب تغير زاوية الاختلاف المرحلى ϕ، بين التيار الذى يأخذ الوضع الأفقى الثابت OD، والضغط على طرفى الملف الثانوى V'_2 (أو V_2)، الذى يأخذ الأوضاع المتغيرة OR، نتيجة لتغير ϕ، نحصل على دائرة أخرى يرسمها الطرف R للمتجه V'_2 (أو V_2)، بحيث يكون مركزها عند O'، ويكون المثلث O'OA مساويا وموازيا للمثلث RCS . لذلك يكون حساب قيمة معامل التنظيم عند أية نقطة مثل R، تتحدد بالزاوية ϕ، عبارة عن $\varepsilon = \frac{RE}{OE}$. وعلى هذا الأساس نستطيع الحصول على المعلومات اللازمة لحساب معامل التنظيم، عند أى معامل قدرة، برسم خط يصنع مع OD الزاوية التى يحددها هذا المعامل . ويتضح من مخطط كاب المرسوم فى شكل (٨ — ٧ حـ) أن تأثير معامل القدرة على معامل التنظيم يكون على النحو التالى : تزداد قيمة معامل التنظيم بازدياد زاوية الاختلاف المرحلى المتأخر حتى يصبح OE على امتداد OO'، فنحصل فى هذا الوضع على قيمة النهاية العظمى لمعامل التنظيم . وفى هذه الحالة نجد أن :

$$\phi = \tan^{-1} \frac{X_{1eq}}{R_{1eq}} = \tan^{-1} \frac{X_{2eq}}{R_{2eq}}$$

وعندما تصبح زاوية الاختلاف المرحلى متقدمة (OE يقع أسفل OD) تقل قيمة معامل التنظيم حتى تصل إلى الصفر عند النقطة F ، أى عنـــدما تصبح ϕ مساوية للزاوية DOF . ومن ناحية أخرى يمكننا أن نستخدم المعادلة (١٠ — ٧) لمتابعة التعبيرات التى تحدث فى معامل التنظيم نتيجة لتغيير الزاوية ϕ :

$$V_1 - V'_2 \cong I_1 Z_{1eq}\left(\frac{I_1 R_{1eq}}{I_1 Z_{1eq}} \cos\phi + \frac{I_1 X_{1eq}}{I_1 Z_{1eq}} \sin\phi\right)$$

$$\cong I_1 Z_{1eq} (\sin\theta' \cos\phi + \cos\theta' \sin\phi)$$

$$= I_1 Z_{1eq} \sin(\phi + \theta') \quad \left[\theta' = \tan^{-1} \frac{R_{1eq}}{X_{1eq}} \right]$$

وبذلك نحصل على قيمة النهاية العظمى لمعـــامل التنظيم عندما يكون $\sin(\theta' + \phi)$ يساوى الواحد الصحيح ، أى عندما يكون $\phi = 90 - \theta'$ ، حيث يصبح :

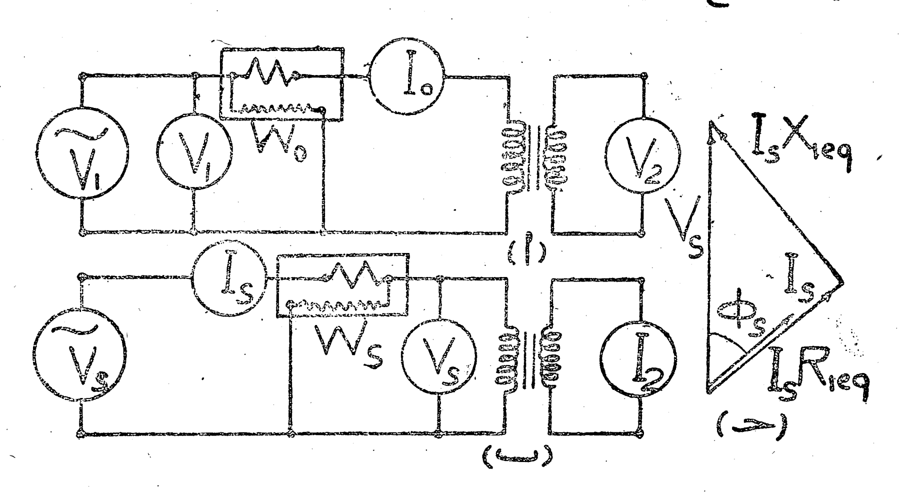
$$\cos\phi = \sin\theta' = \frac{R_{1eq}}{Z_{1eq}} \left(= \frac{R_{2eq}}{Z_{2eq}} \right)$$

$$V_1 \quad V'_2 = I_1 Z_{1eq} [V'_1 - V_2 = I_2 Z_{2eq}]$$

اختبار اللاحمل : (No load Test)

عند اجراء اختبار اللا حمل على المحول يوصل الملفان الابتدائى والثانوى مع أجهزة القياس الكهربية ، كما هو مبين فى شكل (١١ — ٧ أ) ، وذلك مع توصيل طرفى الملف الابتدائى مع الينبوع ذى مقنن الضغط (rated voltage) ، وترك طرفى الملف الثانوى مفتوحين ، أو توصيل فولتمتر بينهما . ويكون توصيل

الفولتمتر فى هذه الحالة ، كما سبق ذكره مع المولدات ، مكافئا لترك الطرفين مفتوحين ، نظرا لارتفاع قيمة المقاومة (أو المعاوقة) الداخلية للفولتمتر ، لدرجة أنه يمكن اعتبار قيمتها مالانهاية ، أى أن تيار القياس ، الذى يأخذه الفولتمتر من الملف الثانوى ، يعتبر مساويا للصفر . أما بالنسبة لناحية الملف الابتدائى ، فانه نظرا لأن تيار اللاحمل ، الذى يقيسه الأمبير متر ، يكون صغيراً ، يستحسن ، للحصول على أكبر درجة من الدقة فى القياس ، عدم مرور أى من تيارى القياس ، للفولتمتر أو ملف الضغط فى الواتمتر ، فى هذا الأمبير متر . لذلك يراعى عدم تغيير الأوضاع النسبية لهذه الأجهزة عما هو مبين فى الشكل .



شكل (١١—٢)

عندما يكون الضغط المقنن موصلا على المحول ، بدون حمل ، يمر تيار اللاحمل الصغير I_0 فى الملف الابتدائى ، وتكون قيمة قدرة الخرج من المحول تساوى صفرا . أما قدرة المدخل W_0 ، التى يأخذها المحول من الينبوع ، فانها تبدد فى فى المفقودات . وتكون المفقودات الحديدية فى هذه الحالة موجودة فى المحول بأكملها ، لوجود مقنن الضغط والتردد . أما مفقودات النحاس ، فهى تلك التى

تنتج عن مرور التيار I_o فى مقاومة الملف الابتدائى ، وتكون ضئيلة لدرجة يمكن معها اهمالها ، كما سبق ذكره ، عند الكلام عن المحول وهو بدون حمل . وعلى هذا الأساس يمكننا أن نحصل على المعلومات الآتيـة ، الخاصة بالمحـول ، من تجربة اللاحمل .

معامل القدرة عند اللاحمل :

$$\cos \phi_o = \frac{W_o}{V_1 I_o}$$

مركبتا تيار اللا حمل :

$$I_{ou} = I_o \sin \phi_o \quad , \quad I_{oa} = I_o \cos \phi_o$$

مركبتا معاوقة التغطس :

$$X_o \cong \frac{V_1}{I_{ou}} \quad , \quad R_o \cong \frac{V_1}{I_{oa}}$$

مفقودات الحديد فى المحول :

$$P_{VFe} = W_o - I_o^2 R_1 \cong W_o$$

نسبة التحويل فى المحول :

$$\frac{T_1}{T_2} \cong \frac{V_1}{V_2}$$

اختبار دائرة القصر : (short circuit test)

يكون التوصيل كما هو مبين فى شكل (١١ — ٧ب) ، حيث يقصر طرفا الملف الثانوى عن طريق توصيلهما إلى أمبير متر ، الذى تعتبر مقاومته (أو معاوقته) صغيرة ، لدرجة يمكن معها اهمالها ، على هذا الأسـاس . ويراعى توصيل ضغط

صغير جدا بالتردد المقنن (فى حدود حوالى 5 % من مقنن الضغط فى المحولات الصغيرة ومتوسطة الحجم عادة) إلى الملف الابتدائى ، بحيث يمر تيار قصر تكون قيمته مساوية تقريبا لتيار الحمل الكامل ، كما سبق أن فعلنا فى حالة المولدات . هذا ويراعى ، فى هذه الحالة أيضا ، أن يكون توصيل أجهزة القياس بنفس الأوضاع النسبية ، كما فى شكل (١١ — ٧ب) ، لكى لا يؤثر هبوط الضغط فى الأمبير متر ، أو فى ملف التيار للواتمتر ، على قراءة الفولتمتر الصغيرة ، أو على الضغط الموجود على ملف الضغط فى الواتمتر . ونظرا لأن قدرة الخرج تساوى صفراً ، فان قدرة المدخل تبدد كلها فى المفقودات . وتكون المفقودات الحديدية ذات قيمة مهملة ، فى هذه الحالة ، نظرا لإنخفاض قيمة الضغط بدرجة كبيرة ، مما يسمح لنا أن نعتبر أن قدرة المدخل تساوى المفقودات النحاسية فى المحول ، المناظرة لتيار القصر المار فيه ، عند عمل اختبار دائرة القصر . فاذا استطعنا أن نجعل تيار القصر مساويا لتيار الحمل الكامل (full load short circuit current) ، عند اجراء هذا الاختبار ، تكون قدرة المدخل مساوية للمفقودات النحاسية ، عند الحمل الكامل ، تقريبا .

يبين شكل (١١ — ٧ح) مخطط المتجهات للمحول ، على أساس الدائرة المكافئة منسوبة إلى الملف الابتدائى ، الموصل إلى الينبوع وقت إجراء التجربة ، حيث نجد أن V'_2 يساوى صفرا ، لوجود قصر على طرفى الملف الثانوى . وفى هذه الحالة يمتص الضغط V_s فى هبوط الضغط فى معاوقة المحول المكافئة ، منسوبة إلى الملف الابتدائى ، Z_{1eq} ، نتيجة لمرور تيار القصر I_s فيها . بذلك يمكن الحصول على المعلومات الآتية ، الخاصة بالمحول ، من قراءات الأجهزة فى اختبار دائرة القصر :

معامل القدره في حالة القصر :

$$\cos \phi_s = \frac{W_s}{V_s I_s}$$

$$Z_{1eq} = \frac{V_s}{I_s} \quad ,$$

$$R_{1eq} = Z_{1eq} \cos \phi_s \quad , \quad X_{1eq} = Z_{1eq} \sin \phi_s$$

أو :

$$R_{1eq} = \frac{W_s}{I_s^2} \quad ,$$

$$X_{1eq} = \sqrt{Z_{1eq}^2 - R_{1eq}^2}$$

المفقودات النحاسية في المحول عند التيار I_s تساوى W_s .

المفقودات النحاسية عند تيار الحمل الكامل I_{f1} تساوى $W_s \left(\frac{I_{f1}}{I_s} \right)^2$

نسبة التحويل للمحول : $\frac{T_1}{T_2} \cong \frac{I_2}{I_s}$

ملحوظة عامة :

تعتبر تسمية الملفين بالابتدائى والثانوى ، في الواقع ، تسمية نسبية ، تتوقف على كيفية استخدام المحول . فالملف الابتدائى هو الملف الموصل إلى الينبوع الموجود ، والملف الثانوى هو الملف الآخر الذى يعطى الضغط المحول . ومن الواضح أنه يمكن استخدام المحول لرفع الضغط أو خفضه ، على حسب ضغط الينبوع المتوفر . لذلك فقد تكون تسمية الملفين بملف الضغط العالى ، وملف الضغط المنخفض ، أكثر تحديداً لهما ، مع ضمان عدم حدوث أى التباس . هذا

ويراعى ، عند اجراء تجربتى اللاحمل ودائرة القصر ، أخذ القراءات على الناحية التى يكون أحد الضغوط العادية المتاحة ، أو أقرب ضغط له ، مناسبا للتوصيل عليها مباشرة ، دون الحاجة إلى استخدام أجهزة مساعدة .

حساب معامل التنظيم :

نحصل من اختبار دائرة القصر على كل من المقاومة المكافئة والممانعة المكافئة للمحول منسوبة إلى أحد الملفين ، على حسب الناحية التى أخذت منها القراءات . وبمعرفة تيار الحمل الكامل ومعامل قدرته ، يمكننا حساب قيمة معامل التنظيم باستخدام أى من المعادلتين (١٠ — ٧) أو (١١ — ٧) .

معامل جودة المحول : (Efficiency of the transformer)

يكون حساب معامل جودة المحول عادة بمعلومية قدرة الخرج ، التى يحتاج اليها الحمل ، ومعامل قدرته ، والمفقودات التى يبددها المحول ، التى تتحدد بناء على قيمتها ، فى هذه الحالة ، قدرة المدخل من الينبوع : ويمكن تحديد قيمة مفقودات الحديد من تجربة اللاحمل ، والمفقودات النحاسية من تجربة دائرة القصر . كما يمكن تحديد المفقودات الحديدية ، بحساب مفقودات التيارات الاعصارية ، ومفقودات التخلف المغناطيسى فى الحديد ، إذا أمكن الحصول على المعلومات اللازمة لذلك ، باستخدام المعادلات المعروفة فى هذا المضمار (هندسة الآلات الكهربية من ص٨٧ إلى ص٩٧) . كذلك يمكن حساب المفقودات النحاسية بمعرفة مقاومة كل من الملفين الابتدائى والثانوى (أو المقاومة الكلية المكافئة منسوبة إلى أحدهما) ، والتيار فى كل منهما (أو التيار منسوبا إلى الناحية التى نسبت اليها المقاومة الكلية المكافئة) ، مع مراعاة أخذ تأثير الظاهرة القشرية ، على قيمة المقاومة ، مع التيار المتردد ، كما سبق أن فعلنا فى حالة المولدات .

إذا فرضنا أن P_{Fe} هى قيمة المفقودات الحديدية ، و P_{cu} قيمة المفقودات النحاسية و P_2 مقنن قدرة المخرج (rated output) ، P_1 مقنن قدرة المدخل (rated input)، كلها بالوات ، وذلك عند مقنن الضغط (rated vo tage) ، ومقنن التيار (rated current) (وهو تيار الحمل الكامل (full load current))

نجد أن معامل الجودة η يتحدد على أساس المعادلة :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{cu}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{Fe} - P_{cu}}{P_1}$$

$$= 1 - \left(\frac{P_{Fe}}{P_1} + \frac{P_{cu}}{P_1} \right) = 1 - \delta \quad \cdots \quad (\text{١٢—٧})$$

حيث δ هو معامل العجز (defficiency factor) ، وهو يقابل المعامل θ ، الذى سبقت الاشارة اليه فى آلات التيار المستمر (هندسة الآلات الكهربية ص ٤٣٦) . ونحصل على قيمة النهاية العظمى η_m لمعامل الجودة ، عندما تكون δ فى نهايتها الصغرى ، حيث يشترط أن تكون $\frac{d\delta}{dI}$ يساوى صفرا . فاذا فرضنا أن $\frac{P_{Fe}}{P_1} = \frac{C_{Fe}}{I}$ باعتبار أن الضغط ثابت ، وفرضنا كذلك $C_{cu}I = \frac{P_{cu}}{P_1}$

نجد أنه عندما تتغير قيمة التيار I تتغير قيمة η ، ويكون :

$$\frac{d\delta}{dI} = -\frac{C_{Fe}}{I^2} + C_{uc} = 0$$

وهذا هو شرط الحصول على η_m

وفى هذه الحالة يكون $C_{Fe} = C_{cu}\, I_m{}^2$ ، مما يعنى أننا نحصل على قيمة النهاية العظمى لمعامل الجودة η_m ، عندما تصبح قيمة التيار I_m ، بحيث تكون مفقودات النحاس ، التى تنتج عن هذا التيار ، مساوية لمفقودات الحديد الثابتة فى المحول

(باعتبار أن التردد والضغط ثابتان) فاذا اعتبرنا أن x هى النسبة بين التيار I_m ، الذى يتحقق معه شرط الحصول على η_m ، وتيار الحمل الكامل I_{fl} ، أى أن $I_m = x\, I_{fl}$ (كل من I_m و I_{fl} يمر فى نفس الملف الابتدائى أو الثـــانوى) ، نجد أن :

$$P_{Fe} = P_{cu} \left(\frac{I_m}{I_{fl}} \right)^2 = x^2 P_{cu}$$

$$\therefore \quad x = \frac{I_m}{I_{fl}} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{cu}}} \quad \cdots\cdots \quad (٧—١٣)$$

يتضح من المعادلة (١٣ — ٧) أن قيمة التيار ، التى نحصل معها على قيمة النهاية العظمى لمعامل الجودة ، بالنسبة لقيمة تيار الحمل الكامل ، تتوقف على قيمة النسبة بين مفقودات الحديد الثابتة ومفقودات النحاس عند الحمل الكامل ، التى تتغير مع مربع التيار . وقد يتراءى لنـا ، بناء عـلى ذلك ، أن نراعى ، عند تصميم المحول ، أن تكون مفقودات الحديد مساوية لمفقودات النحاس عند تيار الحمل ، الذى ينتظر أن يتم تشغيل المحول به معظم الوقت ، حتى نحصل على أعلى قيمة لمعامل الجودة ، طوال وقت التشغيل تقريبا ، مما يؤدى إلى خفض قيمة الطاقة المستهلكة فى المفقودات ، بالكيلووات ساعة ، وبالتالى خفض تكاليف التشغيل إلى أقصى حد ممكن ، من هذه الناحية . ولكن الحكم على ذلك يستدعى منا أن نستعرض نوعى التشغيل الرئيسية للمحول ، اللذين يتحدد بناء عليهما نوعان رئيسيان للمحولات ، تختلف فيهما قيمة النسبة $\frac{P_{Fe}}{P_{cu}}$ ، وذلك كما يأتى :

١ — محولات القدرة (Power transformers) :

هذه هى المحولات التى تستخدم فى محطات القوى الكهربية ، لتحويل ضغط

الآلات المحدود إلى ضغط الإرسال العالى ، وذلك لخفض قيمة مفقودات الإرسال ، كما سبق ذكره فى مطالع هذا الباب . ويكون لكل آلة محول خاص بها لأداء هذه المهمة ، بحيث يكونان معا وحدة قائمة بذاتها ، يتم تشغيلها عندما يتطلب الحمل على المحطة وجودها مع الوحدات العاملة ، وتتوقف عن العمل عندما يخف الحمل على المحطة ، بحيث يمكن أن تستوعبه بعض الوحدات الأخرى فقط ، دون أن يزداد تحميلها عن الحد المعلوم . ويراعى ، على هذا الأساس ، أن يكون عدد الوحدات العاملة بحيث يكون تحميل كل منها فى حدود $\frac{3}{4}$ الحمل الكامل تقريبا ، ولا يقل عن ذلك ، على قدر المستطاع . وهذا يعنى أن محولات القدرة تعمل ، بحيث يكون تحميلها بين $\frac{3}{4}$ حمل والحمل الكامل ، فى أغلب الأحيان ، مما يجعلنا نراعى ، عند تصميم مثل هذه المحولات ، أن تكون قيمة النسبة x من 0.75 إلى 0.9 تقريبا ، أى أن نسبة مفقودات الحديد إلى مفقودات النحاس ، عند مقنن الضغط والتيار ، تتراوح بين 0.6 إلى 0.8 ، وذلك على حسب الشرط الوارد فى المعادلة (١٣ — ٧) ،

٢ — محولات التوزيع . (Distribution transformers)

وهذه هى المحولات التى تستخدم لتحويل ضغط الارسال ، العالى نسبيا ، إلى ضغط منخفض ، يكون مناسبا لتشغيل الأجهزة الكهربية المختلفة . ونظرا لأن مثل هذه الأجهزة تتواجد فى المنازل والورش والمحلات العامة ، ويحتمل تشغيلها فى أى وقت ، أثناء الليل أو النهار ، تظل محولات التوزيع موصلة إلى الينبوع طوال أربع وعشرين ساعة ، مما يجعلها تستهلك المفقودات الحديدية طول هذا الوقت بدون انقطاع . هذا مع أن تحميل المحول بالحمل الكامل قد لا يتجاوز بضع ساعات فى أثناء الليل والنهار ، يزيد عليها تحميله بأجزاء من الحمل ، لكى يظل بقية

الوقت بدون حمل على الاطلاق . فاذا استوفى مثل هذا المحول شرط اعطاء قيمة النهاية العظمى لمعامل الجودة ، على نفس المنوال مثل محول القدرة ، نجد أن الطاقة المستهلكة فى مفقودات الحديد بالكيلووات ساعة على مدار الاربع وعشرين ساعة تصبح كبيرة . وهذا يجعل معامل الجودة اليومى (all day efficiency) ، الذى يحسب على أساس النسبة بين قيمة الطاقة التى يعطيها المحول ، وقيمة الطاقة التى يأخذها من الينبوع ، على مدى الأربع وعشرين ساعة ، يكون منخفضـا ، بسبب ارتفاع قيمة المفقودات الحديدية نسبيا . لذلك يراعى ، عند تصميم محولات التوزيع ، أن تكون نسبة المفقودات الحديدية إلى مفقودات النحاس ، عند مقنن الضغط والتيار صغيرة ، وتتراوح بين 0.15 إلى 0.3 تقريبا . وفى هذه الحالة نجد أن معامل الجودة اليومى يكون مناسبا ، على الرغم من أن معامل الجودة العادى يكون فى قيمة النهاية العظمى له عند نسبة منخفضة جدا من الحمل الكامل ، تتراوح بين حوالى % 40 , % 55 ، التى هى قيمة x . ويمكن ايضاح هذه الحقائق فى المثال الآتى : نفرض أننا فى حالة محول التوزيع ، الذى يعطى قدرة مخرج مقدارها 97.5 كيلووات عند الحمل الكامل ، قد راعينا أن تكون قيمة النهاية العظمى لمعامل جودة المحول البالغ قدرها % 97.5 عند الحمل الكامل . معنى ذلك أن المحول يأخذ قدرة مدخل عند الحمل الكامل مقدارها 100 كيلووات ، فتكون قيمة المفقودات 2.5 كيلووات ، منها 1.25 كيلووات مفقودات حديد ثم 1.25 كيلووات مفقودات نحاس ، لكى يتحقق استيفاء شرط الحصول على η_m عند الحمل الكامل . نفترض أن هذا المحول يعمل بالحمل الكامل 6 ساعات ، وبنصف حمل 8 ساعات ، وبربع حمل 4 ساعات ، وبدون حمل بقية الوقت . وفى هذه الحالة تكون الطاقة المستهلكة فى المفقودات بالكيلووات ساعة W_{24} هى :

$$W_{24} = 1.25 \times 24 + 1.25 \times 6 + 0.3125 \times 8 + 0.078 \times 4$$
$$= 40.3125 \text{ K.W.H.}$$

إذا أصبحت نسبة مفقودات الحديد إلى مفقودات النحاس % 20 ، بدلا من النسبة السابقة 100% ، فاننا نحصل على قيمة النهاية العظمى لمعامل الجودة عند نسبة منخفضة من الحمل الكامل (حوالى % 44,7) . بذلك تصبح قيمة معامل الجودة أقل من η_m عند الحمل الكامل ، ولنفرض أنهما أصبحت % 97 . فتكون قيمة المفقودات الكلية فى المحول 3 كيلووات ، منها 0,6 كيلووات مفقودات الحديد ، ثم 2,4 كيلووات مفقودات النحاس . وفى هذه الحالة نجد أن الطاقة المستهلكة فى المفقودات فى الأربع وعشرين ساعة هى :

$$W_{24} = 0.6 \times 24 + 2.4 \times 6 + 0.6 \times 8 + 0.15 \times 4$$
$$= 34.2 \text{ K.W.H.}$$

مثال (١) :

a—A 10 KVA, 3300/231 V, single phase transformer gave the following test relults : (i) with open circuited primary, readings on the 231 V side : 231 V, 3 amps. 110 W, (ii) with short circuited secondary, readings on 3300 V side: 100 V, 2,5 amps., 150 W. Calculate for full load current at 0,8 power factor lagging the percentage regulation, and the magnetising current

ملحوظة هامة يجب مراعاتها عند حل مسائل المحولات : الكيلو فولت أمبير (KVA) المعطى فى المسألة هو عادة مقنن قدرة المخرج للمحول ، مالم يذكر خلاف ذلك . ولكننا مع ذلك نستخدمه لإيجاد كل من تيارى الملف الابتدائى والثانوى ، باعتبار ضغطى التحويل المعطيين ، كما سوف يتبين من الحلول الآتية :

$$I_1 = \frac{KVA \times 10^3}{V_1} = \frac{10000}{3300} = 3.03 \text{ amps.}$$

$$I_2 = \frac{KVA \times 10^3}{V_2} = \frac{10000}{231} = 43.3 \text{ amps.}$$

يلاحظ أن قراءات تجربة الدائرة المفتوحة قد أخذت على ناحية الضغط المنخفض 231 فولت ، لأنه ضغط مناسب ، يمكن توفره فى المعمل بسهولة أكثر من الضغط 3300 فولت . كما أن قراءات دائرة القصر قد أخذت على ناحية الضغط العالى 3300 فولت ، لأن الضغط الذى نحتاج اليه لإجراء التجربة فى هذه الحالة ، وهو 110 فولت ، يسهل الحصول عليه من الينبوع المعتاد ، فى المعمل.

$$Z_{1eq} = \frac{110}{2.5} = 44 \text{ ohms} \quad , \quad R_{1eq} = \frac{150}{6.25} = 24 \text{ ohms}$$

$$X_{1eq} = \sqrt{(44)^2 - (24)^2} = 36.8 \text{ ohms}$$

باستخدام المعادلة (١٠ — ٧) لحساب معامل التنظيم نجد أن :

$$\varepsilon = \frac{3.03 \times 24 \times 0.8 + 3.03 \times 36.8 \times 0.6}{3300} = 0.0374$$

معامل التنظيم المئوى :

ragulation per cent 3.74 %

مفقودات النحاس عند الحمل الكامل :

$$P_{cu} = \left(\frac{3.03}{2.5}\right)^2 \times 150 = 220.5 \text{ w}$$

$$\eta = \frac{10000 \times 0.8}{10000 \times 0.8 + 110 + 220.5} = 0.96 = 96 \%$$

$$\cos\phi_o = \frac{110}{231 \times 3} = 0.1585 \quad , \quad \sin\phi_o = 0.9874$$

تيار المغطسة :

$$I_{ou} = 3 \times 0.9874 = 2.9622 \text{ amps.}$$

مثال (٢) :

a 125 KVA, 6000/525 V, single phase transformer has iron losses of 1200 watts. With the secondary winding short circuited a voltage of 300 V at normal frequency applied to the primary winding produces a current of 15 amperes in it, the wattmeter reading being 1125 watts. Calculate the secondary terminal voltage and the efficiency at full load 0.8 power factor lagging. Determine also the load for maximum efficiency and the regulation.

$$I_1 = \frac{125000}{6000} = 20.8 \text{ A} \quad , \quad I_2 = \frac{125000}{525} = 238 \text{ A}$$

$$Z_{1eq} = \frac{300}{15} = 20 \text{ ohms} \quad , \quad R_{1eq} = \frac{1125}{225} = 5 \text{ ohms}$$

$$X_{1eq} = \sqrt{400 - 25} = 19.4 \text{ ohms}$$

باستخدام المعادلة (١٠ – ٧) نجد أن :

$$V_1 \quad V'_2 \simeq 20.8 \times 5 \times 0.8 + 20.8 \times 19.4 \times 0.6 = 325.2 \text{ V}$$

$$V'_2 \simeq 6000 - 325.2 \simeq 5674.8 \text{ V}$$

$$V_2 \simeq 5674.8 \times \frac{525}{6000} \simeq 497 \text{ V}$$

$$P_{cu} = 1125 \times \left(\frac{20.8}{15}\right)^2 = 2150 \text{ w}$$

$$\eta = \frac{125000 \times 0,8}{125000 \times 0.8 + 1200 + 2150} = 0.9675 = 96.75\%$$

$$\varepsilon = \frac{325.2}{6000} = 0.054 = 5.4\ \%$$

$$P_{cu} = P_{Fe} \text{ at } \eta_m \rightarrow x^2 \times 1250 = 1200$$

$$\therefore \quad x = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{cu}}} = \sqrt{\frac{1200}{2150}} \cong 0.75 \cong 75\ \%$$

مثال (٣) :

A 90 KVA, 6000/231 V, 50 c/s, single phase trasformer was tested :

(i) with the secondary winding open circuited

(ii) with the secondary winding short circuited, and gave the following readings on the primary (6000 V) side:

(i) open circuit test : 6000 V, 0.65 A, at 0.4 power factor

(ii) short circuit test : 136 V, 10 A, at 0.5 power factor

(a) Find the efficiency and percentage regulation at 0.8 power factor lagging, (b) What must be the magnitude of the high voltage in order that the secondary may deliver full load current at unity power factor and exactly 231 V ?

$$I_1 = \frac{90000}{6000} = 15 \text{ A} \quad , \quad I_2 = \frac{90000}{231} = 389 \text{ A}$$

$$Z_{1eq} = \frac{136}{10} = 13.6 \text{ ohms} \quad , \quad R_{1eq} = 13.6 \times 0.5 = 6.8 \text{ ohms}$$

$$X_{1eq} = Z_{1eq} \sin \phi_{sc} = 13.6 \times 0.866 = 11.8 \text{ ohms}$$

$$P_{cu} = 680 \times \left(\frac{15}{10} \right)^2 = 1530 \text{ W} \ , \ P_{Fe} = 6000 \times 0.65 \times 0.4$$

$$\eta = \frac{90000 \times 0.8}{90000 \times 0.8 + 1560 + 1530} = 95.8 \%$$

$$\varepsilon = \frac{15 \times 6.8 \times 0.8 + 15 \times 11.8 \times 0.6}{6000} = 3.13 \%$$

لكى يعطى الملف الثانوى 231 فولت بشروط الحمل المطلوبة يجب أن يكون :

$$V_1 = V'_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \cong [V_2 + I_2 R_{2eq} \cos\phi + I_2 X_{2eq} \sin\phi] \ \frac{T_1}{T_2}$$

وتستخدم هذه المعادلة التقريبية عندما يختلف معامل القدرة عن الوحدة .

أما إذا كان معامل القدرة يساوى الوحدة ، فان $I_2 R_{2eq}$ يكون فى اتفاق مرحلى مع V_2 (و I_2 أيضا) ، كما يكون $I_2 X_{2eq}$ عموديا على V_2 ، I_2 ، كما يتضح من مراجعة شكل (١٠ — ٧ ب) . وفى هذه الحالة يمكننا حساب قيمة V_1 بالضبط على النحو التالى :

$$V_1 = \left[\sqrt{(V_2 + I_2 R_{2eq})^2 + (I_2 X_{2eq})^2} \ \right] \frac{T_1}{T_2}$$

$$= \frac{6000}{231} \sqrt{(231 + 3.92)^2 + (6.8)^2} = 6110 \text{ V}$$

مثال (٤) :

The following test results were obtained for a 500 KVA, 10000/525 V, 50 c/s, star/star, 3 phase transformer :

(a) With the primary side open circuited, readings on the star connected 525 V side were ; 525 V, 2.1

KW, 27.5 A. (b) With the 525 V side short circuited, readings on the star connected 10000 V side were : 220 V, 1.1 KW, 10.5 A.
Calculate the efficiency and percentage regulation at full load 0.8 power factor lagging as well as the magnetising current. State whether this transforme is a power or a distribution one, and explain in which respects are these two types of transformers different from each other.

يكون حل هذه المسألة على نمط حل المسائل السابقة ، مع مراعاة القيم المرحلية فى خلال الحل ، وذلك على حسب نوع التوصيل ، نجمة أو دلتا .

(التيار المرحلى = التيار الخطى) :

$$I_1 = \frac{500 \times 1000}{\sqrt{3} \times 10000} = 28.85 \text{ A}$$

(التيار المرحلى = التيار الخطى)

$$I_2 = \frac{500 \times 1000}{\sqrt{3} \times 525} = 549 \text{ A}$$

$$Z_{1eq} = \frac{220}{\sqrt{3} \times 10.5} = 12.2 \text{ ohms} \quad \left(\frac{220}{\sqrt{3}} \text{ الضغط المرحلى} \right)$$

$$R_{1eq} = \frac{1100}{3 \times (10.5)^2} = 3.33 \text{ ohms} \quad \left(W_s = \frac{1100}{3} \text{ لكل مرحلة} \right)$$

$$X_{1eq} = \sqrt{(12.1)^2 - (3.33)^2} = 11.6 \text{ ohms}$$

$$P_{cu} = 1100 \times \left(\frac{28.85}{10.5} \right)^2 = 8300 \text{ W}$$

$$\varepsilon = \frac{28.85 \times 3.33 \times 0.8 + 28.85 \times 11.6 \times 0.6}{5780}$$

$$= 4.76 \ \% \qquad \left(5780 = \frac{10000}{\sqrt{3}} = V_1 \right)$$ (الضغط المرحلى)

$$\eta = \frac{400000}{400000 + 2100 + 8300} = 97.3 \ \%$$

$$\frac{P_{Fe}}{P_{cu}} = \frac{2100}{8300} = 0.253$$

المحول يستخدم فى أغراض التوزيع ، أى أنه محول توزيع ، ويرجع إلى ماكتب فى هذا الباب بخصوص الفرق بين محولات القدرة ومحولات التوزيع .

مثال (٥) :

When testing a 200 KVA, 13200/1200 V, 50 c/s, star/delta, 3—phase transformer, it gave the following results; (i) readings on the 1200 V side (line values), with the primary side open circuited, 1200 volts, 3 amps., 2.6 K.W. (ii) Readings on the 1200 V-side (line values) while the 13200 V side is short circuited, 80 volts, 91 amps., 2.5 K.W. Calculate the efficiency and percentage regulation at full load and 0.8 power factor lagging. What value of the primary voltage would give a secondary voltage of 1200 volts at full load and unity power factor ? Calculate the efficiency and percentage regulation in this case.

(التيار المرحلى = التيار الخطى) :

$$I_1 = \frac{200 \times 1000}{\sqrt{3} \times 13200} = 8.78 \ \text{A}$$

(التيار الخطى : $\sqrt{3} \times 55.7 = 96.3$)

$$I_2 = \frac{200 \times 1000}{3 \times 1200} = 55.7 \text{ A}$$

$$Z_{2eq} = \frac{80}{91/\sqrt{3}} = 1.524 \text{ ohms} \left(\frac{91}{\sqrt{3}} \quad \text{التيار المرحلى} \right)$$

$$R_{2eq} = \frac{2500}{3 \times (91/\sqrt{3})^2} = 0.303 \text{ ohms}$$

$$X_{2eq} = \sqrt{(1.524)^2 - (0.303)^2} = 1.495 \text{ ohms}$$

$$P_{cu} = 2500 \times \left(\frac{96.3}{91} \right)^2 = 2810 \text{ W}$$

$$\varepsilon = \frac{55.7 \times 0.303 \times 0.8 + 55.7 \times 1.495 \times 0.6}{1200} = 5.3 \%$$

$$\eta = \frac{160000}{160000 + 2600 + 2810} = 96.6 \%$$

$$V'_1 = \sqrt{(1200 + 16.9)^2 + (83.2)^2} = 1222$$

$$V_1 = 1222 \times \frac{13200}{1200} = 13440 \text{ V}$$

$$\varepsilon_{\cos \phi = 1} = \frac{0.303 \times 55.7}{1222} = 1.37 \%$$

يمكن للحصول على قيمة أدق لـ V'_1 (أو V_1) ، فى هذا المثال أو الأمثلة السابقة ، استخدام المعادلة (١١ — ٧ أ) ، ثم المعادلتين (٨ — ٧) ، (٩ — ٧) ، بدلا من استخدام المعادلتين (١٠ — ٧) ، (١١ — ٧) ، ولكنك سوف تجد أن الفرق فى النتائج لا يذكر ، ولا يستأهل فرق المجهود .

مثال (٦) :

It is required to buy a distribution transformer rated 1500 KVA at 0.8 power factor lagging, to be operated in the following manner during the year ; Full load for 2800 hours, half load for 1600 hours, $\frac{1}{4}$ full load for 1400 hours and the rest of the year on no load. State which of the following two transformers would you choose, if they have the following specifications;

Transformer A ; η at full load 98.5 % and $P_{Fe} = 4.25$ KW

Transformer B : η at full load 98.1 % and $P_{Fe} = 6.5$ KW

Transformer A costs 200 pounds more then transformer B and 1 KWH costs 4 milliems. assume cost of interest and depriciation for money investment 12 % .

تكون المفاضلة بين المحولين على أساس الناحية الاقتصادية ، وذلك باعتبار أنها قد استوفيا جميع الشروط من ناحية المواصفات الفنية. لذلك نختار المحول الذى يكلفنا الثمن الأقل . ويلاحظ أن الثمن هنا يشتمل على شقين ، فهناك الثمن الأساسى الذى ندفعه عند شراء المحول ، وهناك ثمن تكاليف تشغيل المحول ، والمفروض أنها تختلف من محول إلى آخر بسبب اختلاف المفقودات فى كل منهما ، التى تعنى زيادة غير مستفاد بها فى ثمن الطاقة المستهلكة . ولكى تكون المقارنة على أساس سليم ، فان الزيادة فى ثمن أحد المحولين على الآخر تحول إلى دفعة سنوية مستهلكة من رأس المال ، تضاف مع فوائدها إلى ثمن المفقودات فى المحول الأعلى سعراً ، وذلك بسعر الفائدة والاستهلاك (cost of interest and depriciation) المعطى .

$$A - P_{cu} + P_{Fe} = \frac{1500 \times 0.8}{0.985} \times 0.015 = 18.25 \text{ KW} ,$$

$$P_{cu} = 14 \text{ KW}$$

$$B - P_{cu} + P_{Fe} = \frac{1500 \times 0.8}{0.981} \times 0.019 = 23.25 \text{ KW} ,$$

$$P_{cu} = 16.75 \text{ KW}$$

(السنة 8760 ساعة) :

$$A - W_{24} = 8760 \times 4.25 + 2800 \times 14 + 1600 \times 3.5$$
$$+ 1400 \times 0.875 = 83274 \text{ KWH}$$

التكاليف السنوية للطاقة المستهلكة فى المفقودات بالجنيه :

$$83274 \times \frac{4}{1000} = 333.096$$

$$B - W_{24} = 8760 \times 6.5 + 2800 \times 16.75 + 1600 \times 4.188$$
$$+ 1400 \times 1.047 = 112016 \text{ KWH}$$

التكاليف السنوية للطاقة المستهلكة فى المفقودات بالجنيه

$$112016 \times \frac{4}{1000} = 448.64$$

الدفعة السنوية لزيادة ثمن A بالجنيه 24 $= \frac{12}{100} \times 200$ تضاف اليها تكاليفه السنوية ، فتصبح التكاليف الكلية لـ A ، التى تجرى على أساسها المقارنة ، هى 357.096 جنيه .

نجد على هذا الأساس أن المحول A يفضل المحول B ، بسبب الوفر الذى يحققه ، والذى يبلغ 90.968 جنيها سنويا ، ولذلك نختاره .

مسائل على الباب السابع

1 — A 1 — phase, 50 cycle, core — type transformer has square cores of 20 – cm side. The permissible max. flux density is 10000 lines par cm^2. Calculate the number of turns per limb on the high — and low — voltage sides for a 3000/220 – V ratio.

2 — Determine the number of turns per phase in each winding of a 3 — phase transformer wih a ratio of 20000/2000 V, to work on a 50 — cycle network. The high — voltage winding is delta — connected and the low — voltage is star — connected. Each core has a cross section of 560 cm^2. Assume a flux density of about 12000 lines per cm^2.

3 — A 50 — cycle, 3 — phase, core — type transformer is to be built for a 10000/500 — V ratio, connected star/mesh. The cores are to have a square section and the coils are to be circular. Taking an induced electromotive foree of about 15 V per turn; and a maximum core density of about 11000 lines per cm^2 detemine the cross — sectional dimensions of the core, the diameter of the circumscribing circle, and the numbers of turns per phase.

4 — A 1 — phase transformer has 180 and 90 turns respectively in its secondary and primary windings. The respective resistances are 0.233 Ω and 0.067 Ω. calculate the equivalent resistance of (a) the primary in terms of the secondary winding, (b) the secondary in terms of the primary winding, and (c) the total

resistance of the transformer in terms of the primary.

5 — calculate in terms of the primary the effective (equivalent) resistance and the leakage reactance of a transformer which gave the following data on test with the secondary terminals short—ciruited : Applied voltage, 60 V, current, 100 A, power input, 1.2 KW.

6 — A 50—cycle 1 — phase transformer has a turn — ratio of 6. The resistances are 0.90 Ω and 0.03 Ω, and the reactances 5 Ω and 0.13 Ω for high — voltage and low — voltage windings respectively. Find (a) The voltage to be applied to the high — voltage side to obtain full — load current of 200 A in the low — voltage winding on short — circuit, (b) The power — factor on short circuit.

7 — Find the efficiency of a 150 — KVA transformer at 25 % , 33 % and 100 % full — load, (a) at unity power factor, (b) at power factor 0.8 lagging, if the copper loss is 1600 W at full load and the iron loss is 1400 W. Ignore the effects of temperature rise and magnetising current.

8 — In a 25 - KVA, 2000/200 — V transformer the iron and copper losses are 350 and 400 W respectively — calculate the efficiency on unity power factor at (a) full — load and (b) half — load (c) Determine the load for maximnm efficiency and the iron and the copper loss in this case.

9 — calculate the efficiencies at half —, full — and 1 $\frac{1}{4}$ — load of a 100 — KVA transformer for power factors

of (a) unity, (b) 0.8. The copper loss is 1000 W at full — load and the iron loss is 1000 W.

10 — A 125 — KVA transformer with a copper loss of 1.5 KW at full — load, and iron loss 1 KW, has the following equivalent annual load conditions :

full – load at 0.8 Power factor for 2000 hours

one — third load 0.8 power factor for 3000 hours

no – load for the remainder of the year

Find the annual cost of running with energy at 4 m. Per KWH.

11 — A 100 — KVA, 1000/10000 — V, 50 — cycle transformer has an iron loss of 1200 W. The copper loss with 6 A in the high — voltage winding is 500 W – calculate the efficiencies at (i) 25 %, (ii) 50 % and (iii) 100 % of normal load, for power factors of (a) 1.0 and (b) 0.8, the output terminal voltage being maintained at 10000 V. Find also the load for maximum efficiency at both power factors.

12 — A 16000 — KVA, 3 — phase transformer with a voltage ratio of 4000/56000 V, star/star, gave the following test results ; Resistance per phase, 0.004 and 0.6 Ω, measured loss on short - circuit with full - load current, 134 KW. Calculate the average eddy - loss ratio, i.e. the ratio of effective resistance/ ohmic resistance.

13 — A 100 - KVA, 6600/330 - V, 50 cycle, 1 - phase transformer took 10A and 436W at 100V in a short-circuit

test, the figures referring to the high - voltage side. calculate the voltage to be applied to the high-voltage side on full-load at power factor factor 0.8 lagging when the secondary terminal voltage is 330 V.

14 — A 4 - KVA, 200/400 - V, 50 - cycle, 1 - phase transformer gave the following test figures ; No - load low - veltage data, 200 V, 0.7 A, 60 W. short - circuit : high - voltage data, 9 V, 6 A , 21·6 W. calculate (a) the magnetising current and the component corresponding to iron loss at normal voltage and frequency , (b) the efficiency on full load at unity power factor, (c) the secondary terminal voltage on full load at power factors of unity, 0.8 lagging and 0.8 leading.

15 — A 110 - KVA, 1 - phase transformer has a ratio of 11000/440 V. The iron loss measured on open - circuit is 1100 W. with the secondary winding short - circuited a voltage of 500 V at normal frequency applied to the primary produces full - load current, the wattmeter reading 1000 W.Calculate (a) the secondary terminal voltage, (b) the efficiency, when a current of 250 A at a lagging power factor of 0.8 is taken by a load connected to the low - voltage terminals, the primary voltage being 11000 V.

16 — Calculate (a) the full - load efficiency at unity power factor, (b) the voltage at the secondary terminals when supplying full - load secondary current at power factors (i) unity, (ii) 0.8 lagging, (iii) 0.8 leading, for the 4 - KVA, 200/400 - V, 1 - phase transformer

of which the following are the test figures : Open circuit with 200 V applied to primary winding : Current 0.8 A power 70 W. Short circuit with 17.5 V applied to secondary (high-voltage) side : Current 9 A, power 50 W .

17 —A transformer has resistance and reactance drops of 2.5% and 5 % respectively. Plot a curve showing the percentage voltage regulation on full load as a function of power factors between zero lagging and zero leading, The simplified formula may be used. Find the maximum regulation and the power - factor at which this occurs.

18 — Derive the equation of performance of a transformer and show that it may be represented by any one of three equivalent ciruits with equal accuracy. The following test figures were obtaincd for a transformer:

Open - circuit test ;	Primary voltage	= 11000 V
	secondary voltage	= 112 V
	Primary current	= 49 MA
	Primary power	= 280 W
Short - circuit test ;	Primary voltage	= 630 V
	Primary current	= 3 A
	Primary power	= 410 W

The transformer was then used to supply a load of 20 KW at 110 V and at a power factor of 0.8 , current lagging. What were the Primary voltage and current?

19 — Derive an expression for the approximate value of

the voltage regulation of a transformer in terms involving the equivalent resistance and leakage reactance of the windings and the phase angle of the load.

20 — A single - phase, 600 — KVA, 11/33 - KV transformer has its maximum efficiency at 0.7 of full - load current.

The resistance and leakage reactance of the primary winding are 1.2 Ω and 7.0 Ω respectively and the corresponding values for the secondary winding are 10 Ω and 60 Ω respectively. Calculate (a) the percentage voltage regulation on full load 0.8 power factor lagging and (b) the efficiency of the transformer on full load, 0.8 power factor.

21 — A 100 - KVA transformer has a no load loss of 1 KW, and a total loss of 2 KW when supplying a load of 100 KVA at 0.5 power. What is the efficiency when supplying a load of 50 KVA at unity power factor ?

22 — A 50 KVA, 50 - c/s, 3300/250 - V single - phase transformer gave the following test results :

High - voltage winding open - circuited, low - voltage winding supplied : 250 V , 200 W, 5 A.

Low - voltage winding short - circuited, high - voltage winding supplied : 144 V, 400 W, 15.1 A.

Determine the approximate equivalent circuit of the transformer, reffered to the low - voltage side.

23 — What is the condition for maximum efficiency in a transformer ? Give the mathematical proof.

In a 25 KVA, 2000/200 V transformer the iron and copper losses are 350 W and 400 W respctively. Calculate the efficiency on unity power factor at (a) full load and (b) half load. (c) Determine the load for maximum efficiency and the iron and the copper lost in this case,

24 — A 10000 V, 25 c/s transformer has copper, hysteresis and eddy current losses of 1.5, 0.7 and 0.4 % of the output. What will the percentage losses become if the transformer be used on a 20000 V, 50 c/s system, assuming the full load current to be the same ? Compare the full load efficiencies at the two frequencies.

25 — The efficiency of a 400 KVA, single phase transformer is 98 77 % when delivering full load at 0.8 power factor, and 99.13 % at half load and unity power factor. Calcnlate :

(i) the iron loss.

(ii) the full load copper loss.

(iii) the load for maximum efficiency in KVA, and the copper loss in this case.

26 — The following data were obtained for a 20 KVA, 60 c/s, 2400/240 volt, single phase transformer, tested at 60 c/s. With the high voltage winding open circuited, the voltage was 240, current 1.066 amp. and the power 126.6 W, while with the the low voltage terminals short circuited the applied voltage was 57.5, the current 8.34 amp and the power 284

W ; a — Compute the efficiency and regulation for full load current at 0.8 p.f. lagging. b — Find the load power factor for which the efficiency of the transformer at rated KVA load is 0.96. c — Assume that the load power factor is varied while the load current and secondary terminal voltage are held constant, determine the load power factor for which the regulation is maximum. Find this regulation.

27 — A 100 KVA, 6600/330 V, 50 c/s, single phase transformer was tested :

(i) With the secondary winding open circuited.

(ii) With the secondary winding short circuited.

and gave the following reading on the primary (6600V) side.

(i) open circuit test 6600 v, 0.6 amp, at 0.4 power factor.

(ii) short circuit test 150 v, 10 amps, at 0.5 power factor.

(a) Calculate the elements of the magnetising impedance X_o & R_o , and the efficiency at full load 0.8 power factor lagging.

(b) What must be the magnitude of the high voltage in order that the secondary may deliver full load current at unity power factor and exactly 330 v ?

28 — A 300 KVA, 6600/400 V, 50 c/s, delta/star, 3 phase transformer gave the following test results (line values) . (i) With open-circuited primary, readings on the 400 V side (star connected) are 400 V, 1.8 KW, 21.7 amps. (ii) With short-circuited secondary, readings on the 6600 v side (delta connected) are 110 v, 13.1 amps, 940 w.

Calculate for full load current at 0.8 power lagging the afficiency and percentage regulation. Find also the magnitude of the primary voltage so that the secondary may deliver full load at unity power factor at exactly 400 V.

29 — A 110 KVA, single phase transformer has a ratio of 11000/440 V. The iron loss measured on open circuit is 1100 W. With the secondary winding short circuited, a voltage of 500 V at normal freqeney applied to the primary produces full load current, the wattmeter reading 1000 W. Calculate :

(a) the secondary terminal voltage and the efficiency, when a current of 250 A at a lagging power factor of 0.8 is taken by a load connected to the low voltage terminals, the primary voltage being 11000 V.

(b) the values of the hysteresis and eddy current iron losses for operation with 50 c/s, given the following open circuit data :

Voltage applied to low voltage side	440	330	220	110
frequency c/s	50	37.5	25	12.5
Power input in watts	1100	760	460	205

30 — A 50 KVA, 6000/400 V single phase transfomer gave the following test results : (i) With open circuited primary, readings on the 400 V side: 400 V, 10 amps, 800 watts, (ii) With short circuited secondary, readings on the 6000 V side : 200 V, 7.2 amps, 850 watts.

(a) Calculate for full load current at 0 8 power factor lagging, the efficiency and percentage regulation.

(b) What must be the magnitude of the primary voltage so that the secondary may deliver full load at unity power factor at exactly 400 V.

الباب الثامن

توصيلات المحولات وتشغيلها على التوازى

(Connections and parallel operation of the transfomers)

أولا - التوصيلات المختلفة للمحولات

صيانة المحولات : (Maintenance of transformers)

معظم المحولات الحديثة ، حتى الأحجام الصغيرة منها ، التى لايزيد مقنن قدرتها عن بضعة كيلو فولت أمبير ، تكون مغمورة فى الزيت . ومن المعتاد أن يخرج المحول من المصنع ، ويرسل إلى مكان تشغيله وصهريج الزيت (oil tank) الذى يحتوى على المحول ، ممتلىء بالزيت ، وذلك لكى نتفادى تشرب المواد العازلة على الملفات بالرطوبة . ويكون ملء الصهريج بالزيت حتى علامة معينة ، مبينة على الصهريج . وعندما يحتاج المحول إلى تجفيف (drying out) من آثار الرطوبة فانه يلف فى الخيش ، ويسخن بعمل دائرة قصر على الملف الثانوى ، وتقاس درجة حرارة الطبقة العلوية للزيت ، فى أثناء ذلك ، باستخدام ترمومترات كحولية ، حيث يراعى ألا تزيد درجة حرارة الزيت عن 90 درجة مئوية . وتوقف عملية التسخين فى فترات ، تقاس خلالها مقاومة العزل للمواد العازلة ، التى لايجب أن تقل حينئذ عن 20 ميجا أوم تقريبا .

يجب توصيل الصهريج بالأرض (earthing of the tank) دائما قبل تشغيل المحول ، كما يستحسن أن يكون المحول قائما على أرض صلبة hard)

(floor ، مثل الخرسانة المسلحة (reinforced concrete) ، وذلك تلافيا لحدوث الاهتزازات .

وتبدأ عملية الصيانة ، بالنسبة للمحولات الجديدة ، بعد بضعة شهور فقط من بدء تشغيلها ، وذلك بالمراجعة على جميع التوصيلات ، واعادة ربط المسامير جيدا . كما يفحص الزيت جيدا بحثا عن الرواسب (sludge) ، التى يمكن أن تتكون فيه بمرور الوقت ، والتى يجب عند وجودها التخلص منها بأسرع ما يمكن ، وذلك بترشيح الزيت فى مرشح خاص (filter) لهذا الغرض .

بعض اسباب الانهيار فى المحولات :

(Some causes of failure in transformers)

نورد فيما يلى بعض أسباب الانهيار التقليدية (typical causes of failure) التى تحدث عادة فى المحولات :

١ — حدوث دائرة قصر بين اللفات بعضها البعض : وقد ينشأ ذلك نتيجة للاجهادات الميكانيكية ، بسبب شدة الربط على الملفات ، أو نتيجة للتسخين الزائد فى بعض المواضع ، الذى قد ينشأ عن أسباب متعددة ، أو نتيجة لحدوث اندفاعات ضغطية أو ضغوط عارمة (surge voltages) ، بفعل قفل أو فتح الدائرة ، أو بفعل الظواهر الطبيعية .

٢ — ازدياد المفقودات الحديدية بصورة كبيرة عن الحد المعين لها ، وقد يحدث ذلك بسبب انهيار العازل الذى يحيط بمسامير الربط ، نتيجة لتفكك مسامير ربط الرقائق ، وما يلى ذلك من حدوث اهتزازات شديدة فى القلب الحديدى .

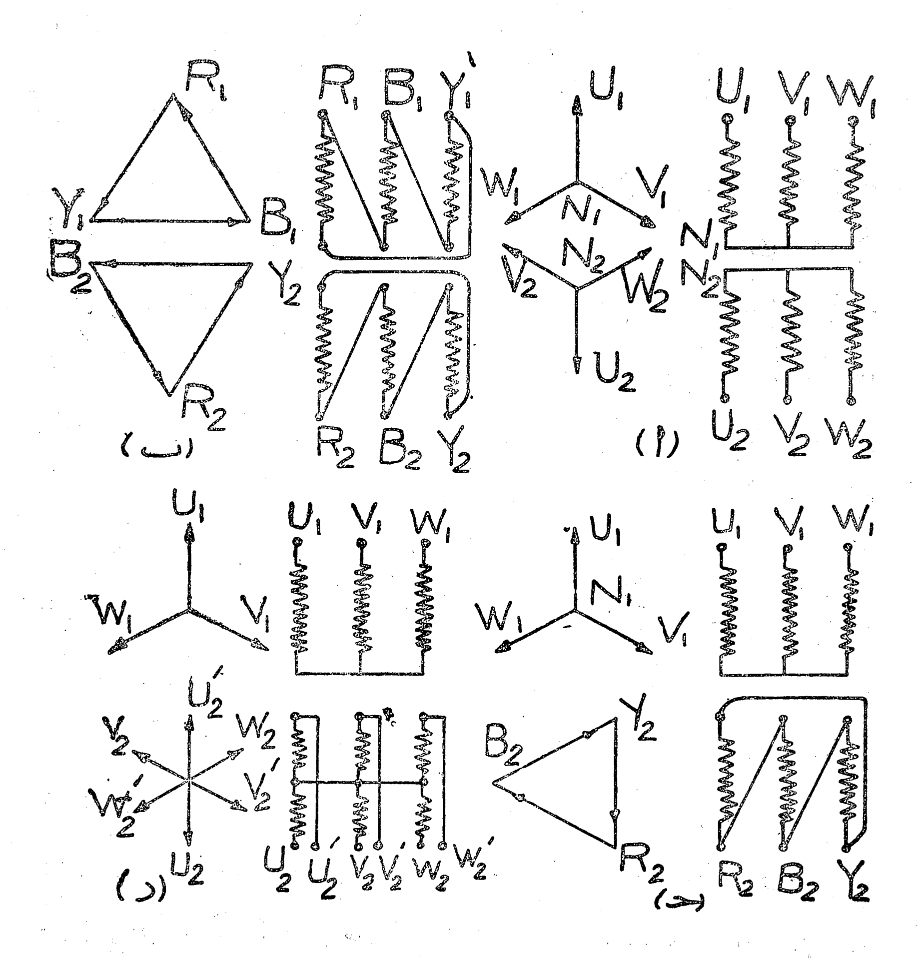
٤ — انهيار فى المواد العازلة ، وذلك بسبب امتصاص الزيت لبعض الرطوبة .

٥ — ازدياد درجة حرارة المحول عن الحد المعلوم ، وذلك بسبب تعدى الحمل ، أو وجود توصيلات خاطئة ، أو بسبب سوء التهوية ، أو غير ذلك من الأسباب التى تؤدى إلى زيادة المفقودات فى المحول عن تلك التى تناظر الحمل الكامل .

المحولات ثلاثية المراحل :

يمكن الحصول على محول ثلاثى المراحل بتوصيل ملفات ثلاثة محولات مفردة المرحلة ، بنفس الطريقة التى توصل بها ملفات المراحل الثلاث فى محول ثلاثى المراحل . وقبل أن نستطرد فى استعراض بعض التوصيلات الهامة للمحولات ثلاثية المراحل ، كما نحصل عليها فى كلتا الحالتين ، نشير باختصار إلى الفروق الجوهرية التى قد تميز إحدى الحالتين عن الأخرى : يمتاز المحول ثلاثى المراحل عن ثلاثة محولات مفردة المرحلة ، موصلة بنفس الطريقة ، بأنه أقل ثمنا ، بطبيعة الحال ، ويحتل حيزا أقل ، كما هو مبين فى شكل (٢—٨ب) . هذا بينما تمتاز ثلاثة محولات مفردة المرحلة ، حين تعمل بدلا من محول ثلاثى المراحل بالمميزات الآتية : أ — يمكن الاحتفاظ بمحول واحد مفرد المرحلة كاحتياطى ، لاستخدامه عند الطوارىء ، وذلك إذا حدث عطل فى أحد المحولات . أما فى حالة استخدام محول ثلاثى المراحل ، فإنه يلزم الاحتفاظ بمحول مماثل ثلاثى المراحل ، كاحتياطى (reserve) . وهذا يعنى أننا نحتفظ فى الحالة الأولى باحتياطى (رأس مال معطل) يوازى ثمنه ثلث رأس المال الأصلى ، بينما نضطر فى الحالة الثانية إلى الاحتفاظ باحتياطى يوازى ثمنه رأس المال الأصلى بأكمله .

ب — إذا حدث عطل (fault) ، فى أحد المحولات الموصلة دلتا ، يمكن استبعاد هذا المحول ، دون أن ينقطع التيار عن أى خط من الخطوط الثلاثة ، سواء من ناحية الينبوع أو من ناحية الحمل ، شكل (٢—٨ح) . وفى هذه الحالة يعمل المحولان الباقيان وهما موصلان دلتا مفتوحة (open delta) ، وكل ما يجب عمله فى هذه الحالة هو تخفيض الحمل على المراحل الثلاث ، حتى يصبح



شكل (١—٨)

التيار الخطى $\frac{I}{\sqrt{3}} = 0.58\ I$ ، حيث I هو تيـــار الخط فى الأحوال المعتادة ، وذلك حتى لا يأخذ أى من المحولين الباقيين حملا زائداً يرهقه . يكون الحمل الكلى على المحولين فى هذه الحالة $V_1\ I$ (فى مقابل $\sqrt{3}\ V_1\ I$ باعتبار معامل القدرة الوحدة عندما تعمل المحولات الثلاثة) ، يخص كل محول منها النصف أى $0.5\ V_1\ I$ ، حيث $I/\sqrt{3}$ هو تيار الحمل الكامل للمحول ($V_1 I/\sqrt{3}$)

توجد طرق كثيرة ، لا يمكن حصرها فى هذا المجال ، لتوصيل الملفـــات الابتدائية ، والملفات الثانوية ، كما هى ، أو بعد تجزئتها بحسابات معينة ، سواء فى المحول ثلاثى المراحل ، أو فى حالة ثلاثة محولات مفردة المرحلة ، معدة لتوصيلها ثلاثية المراحل ، وذلك للحصول على مخطط متجهـات يفى بمتطلبـات خاصـة ، لإستخدام المحول فى أغراض معينة . ويمكن على كل حال تلخيص معظم القواعد العامة ، التى تتحكم فى مثل هذه التوصيلات ، والتى على هداها يمكن رسم مخطط المتجهات ، فى القاعدتين الآتيتين :

١ — بالنسبة للملفين الموضوعين عـلى نفس السـاق فى القلب الحـديدى ، يكون ضغط الينبوع الموصل إلى أحدهما (ويطلق عليه اسم الملف الابتدائى فى هذه الحالة) فى اختلاف مرحلى $180°$ مع الضغط الذى نحصل عليه من الملف الآخـر (الذى يسمى بالملف الثانوى فى هذه الحالة) ، كما هو واضح فى مخطط متجهـات المحول بدون حمل .

٢ — تكون الضغوط الثلاثة ، على الملفات الإبتدائية الثلاثة ، فى أى حالة ، متساوية ومتزنة ، ومختلفة عن بعضها البعض مرحليـا بزاوية مقـدارها $120°$ ، بين كل اثنين متعاقبين منها .

نورد فيما يلى الخصائص المميزة لبعض التوصيلات الهامة ، التى يكثر استخدامها فى الحياة العملية ، وهى مبينة فى شكل (١ — ٨ أ ، ب ، حـ ، د) ، وكذلك فى شكل (٢ — ٨ أ) .

١ — التوصيل نجمة / نجمة (star/star connection) :

يستخدم هذا النوع من التوصيل عادة مع المحولات الصغيرة ذات الضغط العالى من نوع القلب الحديدى ، حتى يكون عدد اللفات ، والضغط على كل لفة منها صغيراً نسبياً ، مما يؤدى إلى الاقتصاد فى وزن النحاس ومواد العزل ، وبالتالى فى ثمن المحول . كما يمكن الاستفادة فى هذه الحالة بنقطتى النجمة لإستخدام موصل رابع ، إذا لزم الأمر . شكل (١ — ٨ أ) .

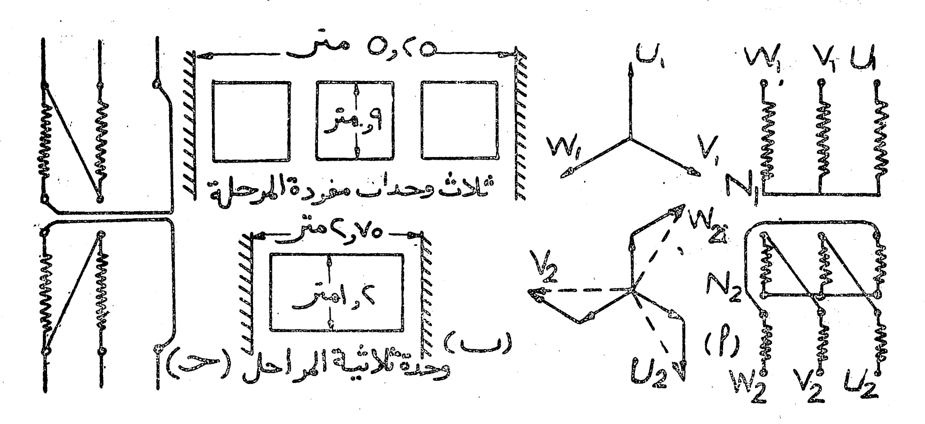
٢ — التوصيل دلتا / دلتا (Delta / delta connection) :

يصبح هذا النوع من التوصيل اقتصاديا فى حالة المحولات الكبيرة ذوات الضغوط المنخفضة ، حيث يزداد فيها عدد اللفات المرحلية ، ولكن مع انخفاض فى مساحة مقطع الملفات . ويمتاز هذا النوع من التوصيل على سابقه ، فى إحتمال التشغيل بدلتا مفتوحة ، كما سبق شرحه ، شكل (٢ — ٨ ب) .

٣ — التوصيل نجمة / دلتا (Star / delta connection) :

يستخدم هذا النوع من التوصيل عادة مع محولات القدرة . وهو يمتاز بوجود نقطة نجمة تصلح فى بعض أغراض التحميل ، مع وجود دلتا تعطى مساراً لتوافقية التيار ذات الدرجة الثالثة ، مما يساعد على تحديد ضغط نقطة النجمة ، وبالتالى اتزان الضغوط المرحلية . وإذا كان التوصيل نجمة ناحية الضغط العالى ، فانه يمكن الاقتصاد فى ثمن المواد العازلة ، كما سبق شرحه فى حالة التوصيل

نجمة/نجمة . ولكن المعتاد عموما توصيل ناحية الضغط العالى دلتا ، عندما يراد تشغيل محركات ، وأحمال اضاءة ، باستخدام أربعة أسلاك ، ناحية الضغط المنخفض . شكل (١ — ٨ ح) .



شكل (٢ — ٨)

٤ — التوصيل نجمة / متعرج (Star / zigzag) :

يستخدم هذا النوع من التوصيل عادة مع موحدات التيار (rectifiers) ، للحصول على خصائص معينة ، كما أن التوصيل المعكوس أى متعرج/نجمة يستخدم بدلا من التوصيل دلتا فى بعض الحالات فى المحولات ذوات الضغوط العالية ، شكل(٢ — ٨ أ) .

٥ — التوصيل ثلاثى المراحل / سداسى المراحل :

(Three — phase to six — phase connection) :

يستخدم هذا النوع من التوصيل للحصول على ست مراحل لتشغيل المحولات المتزامنة (synchronous converters) ، وكذلك لإستعماله مع موحدات التيار ذوات ستة المصاعد ، شكل (١ — ٨ د) .

التوصيل من ثلاث مراحل الى مرحلتين :

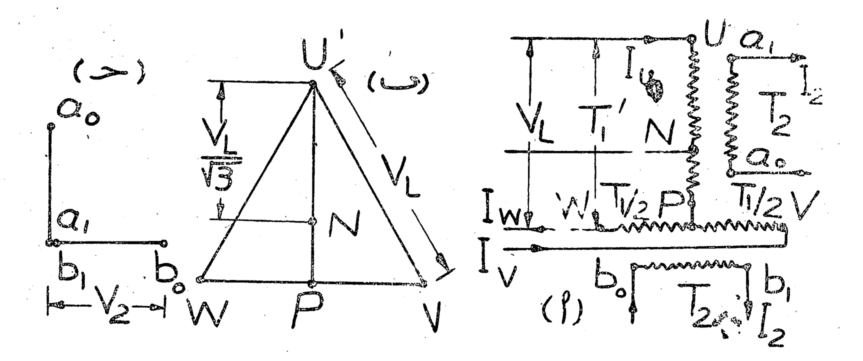
(Three – phase to two – phase connections) :

نحتاج أحيانا إلى تشغيل أجهزة ثنائية المرحلة (two-phase) من ينبوع ثلاثي المراحل . كما يحدث عند تشغيل الأفران ثنائية المرحلة two-phase (furnaces) من ينبوع ثلاثي المراحل . كما أن العكس قد يحدث ، بمعنى أننا قد نحتاج إلى استخدام ينبوع ثنائي المرحلة لتشغيل أجهزة ثلاثية المراحل . وفى كلتا الحالتين تستخدم المحولات بتوصيلات معينة ، للربط بين المجموعة ثلاثية المراحل (3–phase system) والمجموعة ثنائية المرحلة (two–phase system). وهناك طرق كثيرة معروفة لتنفيذ ذلك ، أهمها طريقة سكوت ، التى نقوم بشرحها فيما يلى .

طريقة سكوت للربط بين مجموعة ثلاثية المراحل واخرى ثنائية المراحل :

(Scott method for interconnection between two and three phase systems) .

يستخدم فى هذه الحالة محولان متقن قدرتهما واحد تقريبا ، ويحتوى أحدهما على عدد من اللفات مقداره T_1 ، والثانى T'_1 فى ناحية ، وهى التى يتم توصيل المجموعة ثلاثية المراحل عليها ، وكل منهما على عدد من اللفات T_2 فى الناحية الأخرى ، وهى التى يتم توصيل المجموعة ثنائية المرحلة عليها ، كما هو مبين فى شكل (٣— ٨) تقسم ملفات أحد المحولين T'_1 عند النقطة N ، بحيث يقع بين طرف المجموعة الثلاثية u ، التى توصل مع الطرف الأول لهذه الملفات، ونقطة التوصيل N ، الموصلة إلى نقطة النجمة فى المجموعة الثلاثية ، عدد من اللفات يساوى $\frac{T_1}{\sqrt{3}} = 0.576T_1$ ،



شكل (٣ — ٨)

هذا بينما يوصل الطرف الآخر لنفس الملفات مع نقطة التقسيم P ، التي تقسم ملفات المحول الآخر T_1 إلى قسمين متساويين ، كل منهما يساوى $\frac{T_1}{2} = 0.5T_1$. ويوصل طرفا ملفات هذا المحول الآخر T_1 مع طرفى المجموعة ثلاثية المراحل الباقيين وهما W , V . يمثل طرفا الملفات T_2 للمحول الأول إحدى المرحلتين ، بينما يمثل طرفا الملفات T_2 للمحول الآخر المرحلة الثانية فى المجموعة ثنائية المرحلة .

نفرض أن الأطراف W , V , U قد وصلت إلى خطوط ينبوع كهربى متماثل ، ثلاثى المراحل ، ضغطه الخطى V_L ، بينما توصل النقطة N مع خط التعادل ، أى أنها تمثل نقطة النجمه أو التعادل فى المجموعة الثلاثية . لكى يكون الضغط بين N وكل من W , V هو نفس الضغط المرحلى $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$ ، وهو نفس نفس الضغط بين N , U أيضا ، يجب أن يكون عدد اللفات بين P , N نصف عدد اللفات بين U , N كما يتضح من شكل (٣ — ٨ ب) ، وبذلك نجد أن :

$$T'_1 = \frac{T_1}{\sqrt{3}} + \frac{T_1}{2\sqrt{3}} = \frac{2\,T_1 + T_1}{2\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}}{2}\,T_1$$

وهكذا يصبح الضغط لكل لفة E_t بالنسبة للفات UN وعددها $\frac{T_1}{\sqrt{3}}$ ، أو اللفات NP وعددها $\frac{T_1}{2\sqrt{3}}$ ، أو اللفات UP وعددها $\frac{\sqrt{3}\ T_1}{2}$ ، أو اللفات WV وعددها T_1 ، واحدا ، حيث نجد أن الضغوط على هذه اللفات هى على الترتيب $\frac{V_L}{\sqrt{3}}$ ، $\frac{V_L}{2\sqrt{3}}$ ، $\frac{\sqrt{3}\ V_L}{2}$ ، V_L :

$$E_t = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \div \frac{T_1}{\sqrt{3}} = \frac{V_L}{2\sqrt{3}} \div \frac{T_1}{2\sqrt{3}}$$

$$= \frac{\sqrt{3}\ V_L}{2} \div \frac{\sqrt{3}\, T_2}{2} = \frac{V_L}{T_1} \quad \cdots\cdots \quad (\text{١—٨})$$

وبالنسبة للملفات الثانوية فى كلا المحولين ، نجد أن قيمة الضغط على كل منهما وعدد لفاته T_2 ، هو $V_2 = \frac{T_2}{T_1} V_L$. ويكون الضغطان متعامدين ، بحيث يمثلان بذلك مجموعة ثنائية المرحلة ، كما يتضح من شكل (٣—٨ ح) . ومن البديهى أنه عند عكس الأوضاع ، أى عندما يوصل إلى الملفات T_2 فى المحولين ضغطا ينبوع كهربى متماثلان ، ثنائيا المرحلة V_2 ، نحصل بين الأطراف U, V, W على ضغوط خطية متماثلة ، ثلاثية المراحل V_L ، بحيث تكون قيمة V_L هى $V_2\ \frac{T_1}{T_2}$.

عندما يكون الحمل على المجموعة ثنائية المراحل متماثلا ، أو متزنا . ويتمثل فى تيار قيمته I_2 ، يمر فى كلا الملفين T_2 ، ويكون فى اتفاق مرحلى مع الضغط على طرفى كل منهما ، يمر فى الملفات UP التيار I'_1 بحيث يكون :

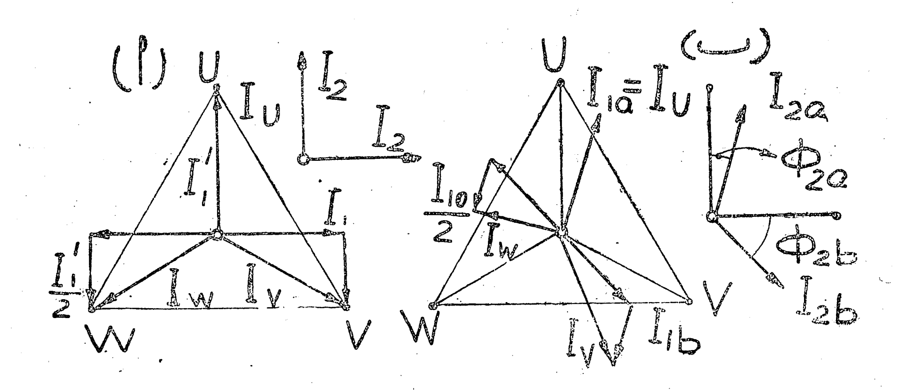
$$I'_1 = I_{2a} \times \frac{T_2}{T'_1} = I_{2a} \times \frac{T_2}{\frac{\sqrt{3}}{2}\, T_1} = 1.15\ \frac{T_2 I_{2a}}{T_1} \quad (\text{٢—٨})$$

ويكون هذا هو التيار فى الخط المتصل بالطرف U ، وهو يمر فى جميع اللفات T'_1 ، أو بمعنى آخر فى المرحلة UN من المجموعة الثلاثية ، وفى الجزء من اللفات NP .

لكى نحصل على التيارين الباقيين فى المجموعة الثلاثية ، وهما المارات فى الطرفين W , V ، يجب أن نراعى أن مجموع التيارات الثلاثة عند P يجب أن يساوى صفرا عند أية لحظة . لذلك يجب أن يحتوى كل من هذين التيارين على مركبة تساوى وتضاد $\frac{I'_1}{2}$ ، علاوة على المركبة I_1 ، التى تمر لكى تعطى التعادل فى الأمبير لفات بين كل من T_2 عندما يمر فيها التيار I_{2b} ، و T_1 عندما يمر فيها التيار I_1 حيث :

$$I_1 = \frac{I_{2b}\ T_2}{T_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٣ - ٧)$$

ويتضح من شكل (٤ — ٨ أ) أن التيارين فى الخطين المتصلين بالطرفين



شكل (٤ — ٨)

W , V ، وهما I_V , I_W ، يكونان على هذا الأساس متساويين فى القيمة للتيار I_{1F} ،

كما أن التيارات الثلاثة تكون مجموعة ثلاثية متزنة ، وذلك عندما يكون I_{2a} يساوى I_{2b} فى القيمة ويتفق معه مرحلياً ، أى عندما تكون المجموعة الثنائية متزنة . ويكون $I_{2a} = I_{2b} = I_2$ فى هذه الحالة .

شكل (٤ — ٨ب) يبين كيف تكون تيارات المجموعة الثلاثية غير متزنة ، عندما يكون تيارا المجموعة الثنائية غير متزنين . ويمكن الحصول على تيارات المجموعة الثلاثية المتزنة ، عندما يكون تياراً المجموعة الثنائية متزنين ، ويصنع كل تيار منهما زاوية ϕ مع الضغط المناظر ، وذلك برسم مخطط المتجهات على نمط مخطط المتجهات فى شكل (٤ — ٨ب) ، باعتبار أن $I_{2a} = I_{2b}$ وأن $\phi_{2a} = \phi_{2b}$.

هذا ويتضح من الشكل (٤ — ٨ أ) أنه عندما يكون معامل القدرة الواحد الصحيح ، فانه يمكن الحصول على قيمة كل من I_V , I_W (اللذين يكونان متساويين فى هذه الحالة) بالرسم ، أو من المعادلة :

$$I_V = I_W = \sqrt{(I_1)^2 + \left(\frac{I'_1}{2}\right)^2} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (٤ - ٨)$$

ويكون معامل القدرة فى المرحلة u هو نفس معامل القدرة فى المرحلة a ، أى أن $\phi_u = \phi_{2a}$ ، بينما تكون زاوية الاختلاف المرحلى فى كل من V , W هى $\phi_w = \phi_v = \left(30 - \tan^{-1}\frac{I_1}{2I'_1}\right)$ ، وتراعى الاشارة الناتجة لتعيين ماإذا كان التيار متأخرا أو متقدما (متأخر عندما تكون الزاوية سالبة ، ومتقدم عندما تكون موجبة) .

بالرجوع إلى الشكل (٤ — ٨ب) نجد أن الزاوية المقابلة للتيار I_v ، فى المثلث الذى يحتويه ، هى $\theta_v = 90 - \phi_{2a} + \phi_{2b}$. بينما تكون الزاوية المقابلة

للتيار I_w ، فى المثلث الذى يحتويه ، على نفس الخط السـابق ، هى $\theta_w = 90 - \phi_{2b} + \phi_{2a}$. بذلك يمكن الحصول على قيمة كل من هذين التيارين باعتباره ضلعاً فى المثلث المعنى :

$$I_v = \sqrt{(I_1)^2 + \left(\frac{I'_1}{2}\right)^2 - I_1 I'_1 \cos\theta_v}$$

$$I_w = \sqrt{(I_1)^2 + \left(\frac{I'_1}{2}\right)^2 - I_1 I'_1 \cos\theta_w} \quad \cdots \quad (٨ - ٥)$$

بالرجوع إلى شكل (٤ — ٨ ح) يمكننا تعيين زاوية الاختلاف المرحلى ϕ_v بين التيار I_v والضغط المرحلى المناظر ، وكذلك زاوية الاختلاف المرحلى ϕ_w بين التيار I_w والضغط المرحلى المناظر ، حيث نجد أن :

$$\phi_v = 30 - \phi_{2b} - \alpha_v$$

ويمكن الحصول على قيمة α_v بدلالة التيارات التى حصلنا عليها ، وذلك باستخدام العلاقة بين أطوال وأضلاع المثلث وجيوب زواياه ، حيث :

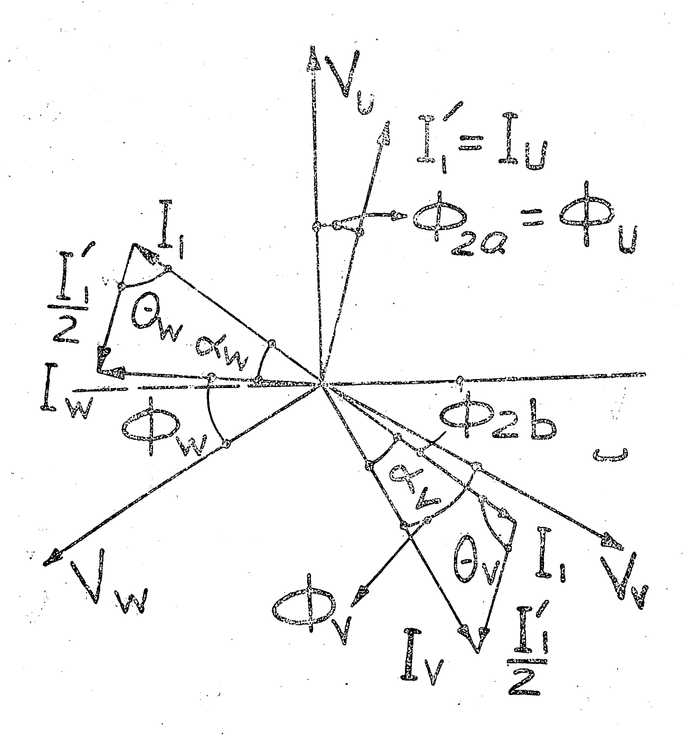
$$\frac{I'_1}{2\sin\alpha_v} = \frac{I_v}{\sin\theta_v} \quad ;$$

$$\sin\alpha_v = \frac{I'_1}{2 I_v} \sin\theta_v$$

$$\alpha_v = \sin^{-1}\frac{I'_1}{2 I_v} \sin\theta_v \quad \cdots\cdots\cdots \quad (٨ - ٦)$$

$$\phi_w = \alpha_w - (30 + \phi_{2b})$$

$$\frac{I'_1}{2\sin\alpha_w} = \frac{I_w}{\sin\theta_w} \quad ,$$



شكل (٤ — ٨ ب)

$$\sin \alpha_w = \frac{I'_1}{2\, I_w} \sin \theta_w$$

$$\alpha_w = \sin^{-1} \frac{I'_1}{2\, I_w} \sin \theta_w \quad \cdots\cdots\cdots \quad (٨ — ٧)$$

يمكن بناء على ماسبق شرحه حساب القدرة فى المجموعة الثنائية P_2 ، وكذلك القدرة فى المجموعة الثلاثية P_3 ، ثم حساب معامل الجودة .

$$P_2 = V_2\, I_{2a} \cos \phi_{2a} + V_2\, I_{2b} \cos \phi_{2b}$$

$$P_3 = V_u\, I_u \cos \phi_u + V_v\, I_v \cos \phi_v + V_w\, I_w \cos \phi_w \cdots (٨ — ٨)$$

لكى نفرق بين المحولين المستخدمين فى هذه التوصيلات ، يطلق على المحول

الذى يحتوى على الملفات T_1 اسم المحول الرئيسى (Main transformer) ، بينما يطلق على المحول الذى يحتوى على الملفات $T_1 \frac{\sqrt{3}}{2}$ اسم المحول المضايق (Teaser transformer) . ونلاحظ بناء على التحليلات السابقة أنه بينما يكون التيار واحداً فى المحولين ، فان الضغط بالنسبة للمحول الرئيسى يكون أكبر من الضغط بالنسبة للمحول الآخر بحوالى 15 % ، مما يستدعى أن يكون مقنن قدرة المحول الرئيسى أكبر من مقنن قدرة المحول المضايق بما يساوى 15 % أيضا . ومن الممكن بطبيعة الحال استخدام محولين بنفس مقنن قدرة المحول الرئيسى ، كما سبقت الاشارة اليه من قبل .

مثال (١) :

A Scott — connected transformer is fed from a 6600 V 2 phase network and supplies 3 phase power at 500 V between lines on a 4 — wire system. If there are 500 turns per phase on the 2 — phase side, find the number of turns in the low voltage winding, and the position of the tapping of the neutral wire. Show that if the load is balanced on one side it wil' also be balanced on the other side.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_L} = \frac{6600}{500} = 13.2$$

$$T_1 = \frac{500}{13.2} = 38$$

$$T'_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} T_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 38 = 33$$

$$\frac{T'_1}{3} = 11 \qquad \text{عدد اللفات } N_P$$

$$\frac{2T'_1}{3} = 22 \qquad \text{عدد اللفات } N_u$$

يمكن الاجابة على الجزء النظرى بالرجوع إلى شكل (٤ – ٨ أ) ، وماكتب عنه .

مثال (٢) :

Two 1 – phase, Scott — connected transformers supply a 3 – phase, 4 — wire, 50 c/s distribution system with 250 V between lines and neutral. The high — voltage windings are connected to a 2 — phase system with a phas voltage of 11000 V. allowing a maximum flux density not exceeding 12000 lines per cm^2 in a gross core section of 550 cm^2, determine the number of turns in each section of the high — voltage and low — voltage windings, and the position of the neutral point.

الضغط الخطى فى المجموعة الثلاثية :

$$V_L = \sqrt{3} \times 250 = 433 \text{ V}$$

ضغط المجموعة الثنائية :

$$V_2 = 11000 \quad \text{V}$$

$$E_t \leq 4.44 \times 50 \times 12000 \times 550 \times 10^{-8} \leq 14.65$$

وهذه هى قيمة الضغط لكل لفة على الناحيتين ، وهى تساوى كلا من $\frac{V_L}{T_1}$ ، وكذلك $\frac{V_2}{T_2}$. ويمكن أخذ قيم أصغر لـ E_t باعتبار قيم أصغر لكثافة الخطوط ، التى اشترط ألا تزيد عن 12000 خط/سم٢ ، وفى هذه الحالة يراعى اختيار عدد اللفات T_1 على المحول الرئيسى ، بحيث تكون عددا صحيحا . وفى نفس الوقت يجب أن تكون T'_1 أيضا عدداً صحيحا يقبل القسمة على 3 ، حتى يمكن تحديد النقطة N ، بحيث يكون عدد اللفات UN يساوى ضعف عدد اللفـــات NP ، ويكون كل منها عـددا صحيحا فى نفس الوقت . وعلى هـذا الأسـاس نستطيع تحديد قيمة T_1 على النحو التالى :

$$T_1 \geqq \frac{V_L}{E_t} \geqq \frac{250 \times \sqrt{3}}{14.65} \geqq 30$$

يمكننـــا أن نختـار لـ T_1 أول أكبر قيمـــة بعد 30 ، بحيث يكون $T'_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} T_1$ عدداً صحيحا يقبل القسمة على 3 ، وهـو العدد 30 . وفى هذه الحالة تكون قيمة T_1 عبارة عن 35 ، أى أنه على حسب شكل (٣ــ٨ أ) نجد أن :

$$T_1 = 35 \quad , \quad T'_1 = 30 \quad , \quad NP = 10 \quad , \quad NU = 20$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_L} = \frac{11000}{433} = 25.4$$

$$T_2 = 35 \times 25.4 = 888$$ لفة

مثال (٣) :

Two 1 — phase furnaces a and b are supplied at 80 V by means of a Scott — connected transformer combination from a 3 — phase, 6600 V system. The Voltage of furnace a is leading. Calculate the line currents on the 3 — phase side when the furnaces take 500 KW and 800 KW respectively (i) at unity power factor (ii) furnaee a at unity p f., furnace b at 0.7 p f. lagging, and draw the corresponding vector diagrams.

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_L}{V_2} = \frac{6600}{80} = 82.5$$

التيار فى الفرن a :

$$i)\quad I_{2a} = \frac{500 \times 1000}{80} = 6250 \quad A$$

باستخدام المعادلة (٢ — ٨) نحصل على التيار فى الخط المتصل بالطرف u ، وهو نفسة التيار I'_1 المار فى اللفات T'_1 :

$$I_u = I'_1 = 1.15 \times \frac{6250}{82.5} = 87.5 \quad A$$

التيار فى الفرن b :

$$I_{2b} = \frac{800 \times 1000}{80} = 10000 \quad A$$

باستخدام المعادلة (٣ — ٨) نحصل على التيار I_1 المار فى كل قسم من اللفات $\frac{T_1}{2}$ مع التيار $\frac{I'_1}{2}$ ، حيث :

$$I_1 = \frac{10000}{82.5} = 121.1 \quad A$$

بالرجوع إلى الشكل (٤ — ٨ أ) واستخدام المعادلة (٤ — ٨) نحصل على التيارين I_v ، I_w ، المتساويين فى هذه الحالة ، نظرا لوجود تماثل ، حيث :

$$I_w = I_v = \sqrt{(I_1)^2 + \left(\frac{I'_1}{2}\right)^2}$$

$$= \sqrt{(121.1)^2 + (43.75)^2} = 129 \quad A$$

ii) $I_{2a} = 6250 \quad A \qquad , \qquad I_u = I'_1 = 87.5 \quad A$

إذ لم يتغير شىء بالنسبة للفرن a

التيار فى الفرن b :

$$I_{2b} = \frac{800 \times 1000}{0.7 \times 80} = 14300 \quad A$$

$$I_1 = \frac{14300}{82.5} = 173.2 \quad A$$

باستخدام الشكل (٤ — ٨ب) نحصل على التيارين I_v ، I_w ، وهما غير متساويين فى هـــــــذه الحـالة . ويراعى أن ϕ_{2a} تساوى صفراً ، وأن $\phi_{2b} = \cos^{-1} 0.7$. نحصل على قيمة كل من التيارين من الشكل المرسوم على هذا النحو ، حيث :

$$I_v = 207 \quad A \qquad , \qquad I_w = 145 \quad A$$

كذلك يمكن أن نحصل على قيمة كل من I_w ، I_v باستخدام المعادلة (٥ — ٨) حيث :

$$\phi_{2a} = 0 \quad , \quad \phi_{2b} = \cos^{-1} 0.7 = 45.5^{\circ}$$

$$\theta_v = 90 + 45.5 = 135.6^{\circ} \quad , \quad \cos \theta_v = -0.713$$

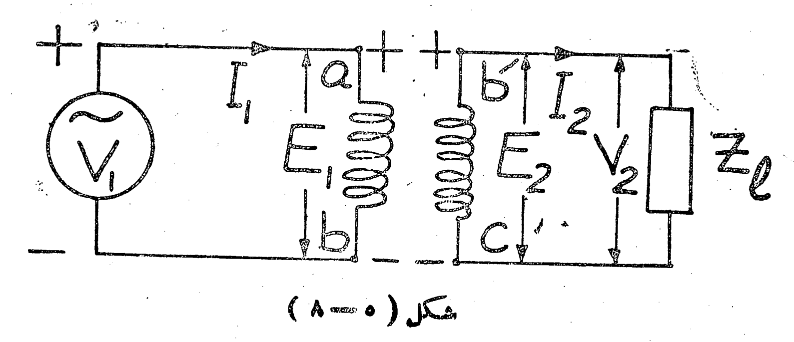
$$\theta_w = 90 - 45.5 = 44.5^{\circ} \quad , \quad \cos \theta_w = 0.713$$

$$I_v = \sqrt{3 \times 10^4 + 0.187 \times 10^4 + 1{,}082 \times 10^4} = 207 \text{ A}$$

$$I_w = \sqrt{3 \times 10^4 + 0.187 \times 10^4 - 1.082 \times 10^4} = 145 \text{ A}$$

المحول الذاتى : (The auto — transformer)

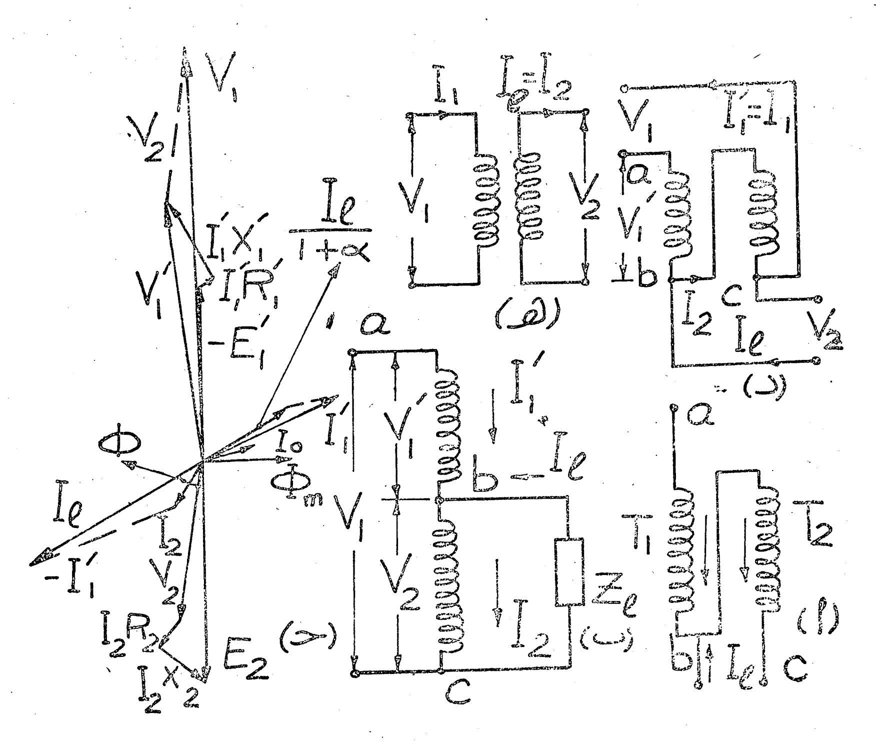
يبين شكل (٥—٨) الدائرتين ، الابتدائية والثانوية ، لمحول مفرد المرحلة مع تعيين قطبية الأطراف المختلفة الملفين ، الابتدائى والثانوى ، عند لحظة معينة واتجاهى التيارين I_1 ، I_l ، بناء على ذلك . ويكون تيار الحمل هو نفس تيار



شكل (٥—٨)

الملف الثانوى I_2 . إذا وصل الطرفان b ، b′ نحصل على ما يسمى بالمحول الذاتى كما هو مبين فى شكل (٦—٨ أ) ، الذى يوضح الاتجاهات الموجبة للتيارات ، على هدى ما جاء فى شكل (٥—٨) . ويبين شكل (٦—٨ب) الدائرة الكهربية لمثل هذا المحول ، مع وجود معاوقة الحمل Z_l .

إذا رمزنا لحدود الملف الابتدائى ، فى حالة التوصيل كمحول ذاتى ، بنفس الرموز الأصلية مع شرطة فوق الرمز ، أى T'_1 ، I'_1 ، E'_1 ... ألخ ، يمكننا



شكل (٦—٨)

أن نستخلص النتائج الآتية ، بالنسبة للمحول الجديد ، مستفيدين فى خلال ذلك من معلوماتنا عن الحالة الأصلية :

١ — نظراً لوجود نفس العلاقة بين القوتين الدافعتين الكهربيتين فى الملفين T'_1 ، T_2 ، لتشابكهما مع نفس الفيض المتبادل بينهما ، كما كان الأمر من قبل ، نجد أن $\alpha = \frac{E'_1}{E_2} = \frac{T'_1}{T_2}$

٢ — عند تحميل المحول يجب أن يبقى الفيض المتبادل بدون تغيير ، وهذا يستدعى أن يكون المجموع الاتجاهى (vector addition) للامبير لفات التى يعطيها كل من الملفين ، الابتدائى والثانوى ، فى هذه الحالة ، مساويا لمتجه الامبير

افات التى نحصل عليها من الملف الابتدائى بدون حمل ، كما سبق شرحه بالنسبة للمحول العادى ، بالإشارة إلى شكل (٨—٧ أ) . لذلك نجد أن :

$$T'_1 \dot{I}'_1 + T_2 \dot{I}_2 = (T'_1 + T_2)\dot{I}_o$$

$$\therefore \quad \dot{I}_2 = (1+\alpha)\dot{I}_o - \alpha\,\dot{I}_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٨—٩)$$

وبتطبيق قانون كيرشوف الثانى عند النقطة b فى شكل (٦—٨ب) نجد أن:

$$\dot{I}_2 = \dot{I}'_1 + \dot{I}_l \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٨—١٠)$$

نحصل من المعادلتين (٩—٨) ، (١٠—٨) على $\dot{I}'_1$ بدلالة $\dot{I}_l$:

$$\dot{I}'_1 + \dot{I}_l = (1+\alpha)\dot{I}_o - \alpha\,\dot{I}_1$$

$$\therefore \quad \dot{I}'_1 = \dot{I}_o - \frac{\dot{I}_l}{(1+\alpha)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٨—١١)$$

٣ — بتطبيق قانون كيرشوف الأول على الدوائر المختلفة فى شكل (٦—٨ب) ، نحصل على النتائج الآتية :

$$\dot{V}'_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}'_1\,\dot{Z}'_1 = -\dot{E}'_1 + \dot{I}'_1(R'_1 + jX'_1)$$

$$\dot{V}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2\,\dot{Z}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_2) \quad \ldots \quad (٨—١٢أ)$$

$$\dot{V}_1 = \dot{V}'_1 - \dot{V}_2 = (\dot{E}'_1 + \dot{E}_2) + \dot{I}_1\dot{Z}'_1 + I_2\,Z_2$$

$$= (1+\alpha)\dot{E}_2 + \dot{I}'_1\dot{Z}'_1 + \dot{I}_2\,\dot{Z}_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٨—١٢ب)$$

يبين شكل (٦ — ٨ ح) مخطط المتجهات للمحول الذاتى ، وهو محمل ، مرسوما على أساس المعادلات (١٠ — ٨) ، (١١ — ٨) ، (١٢ — ٨) . هـذا ويجب ، كما سبق أن نبهنا فى مواضع سابقة ، التفرقة بين هبوط الضغط ، ومركبـــة ضغط الينبوع اللازمة لمعادلة هذا الهبوط ، اللذين يكونان فى اتجاهين متضادين ، عند رسم مخطط المتجهات ، وعند تطبيق قانون كيرشوف الأول . لذلك نلفت النظر فى هذا المضمار إلى أنه ، بينما يمثل V_2 متجه الضغط فعلا فى شكل (٦ — ٨ ح) ، فان V'_1 تمثل مركبة ضغط الينبوع اللازمة بين النقطتين a , b لتمرير التيار I'_1 . وقد أدى ذلك إلى استخدام $\dot{V}_2$ باشارة سالبة فى المعادلة (١٢ — ٨) ، التى تطبق قانون كيرشوف على أساس متجهى مركبتى ضغط الينبوع ، لا على أساس متجه هبوط الضغط الفعلى والقوة الدافعة الكهربية المضادة .

بناء على ما سبق كله يكون $\dot{V}_1$ هو متجه ضغط الينبوع ، اللازم توصيله بين النقطتين a , c ، للحصول على تيار الحمل $\dot{I}_l$ ، فى معاوقة الحمل $\dot{Z}_l$ الموصلة بين الطرفين b , c ، فى المحول الذاتى ، بالعلاقات المعطاه ، وكما هو مبين فى شكل (٦ — ٨ ح) ، حيث نجد أن : (أ) V_2 هو الضغط اللازم على طرفى الحمل و I_2 هو تيار الحمل المناظر ، الذى يصنع مع هذا الضغط زاوية الاختلاف المرحلى φ ، التى تتوقف على طبيعة الحمل . (ب) E_2 هى القوة الدافعة الكهربية اللازم وجـــودها بين الطرفين b , c على هذا الأساس ، وهى متخلفة عن الفيض المغناطيسى المتبادل ϕ_m بزاوية مقدارها 90 درجة كهربية . (ح) الفيض المغناطيسى ϕ_m فى اتفاق مرحلى مع تيار التمغطس $I_{\mu o}$ ، الذى هو عبارة عن المركبة الأفقية لتيار اللاحمل I_o . (د) E'_1 هى القوة الدافعة الكهربية التى يولدها نفس هذا الفيض ϕ_m بين الطرفين b , a ، وهى فى توافق مرحلى مع E_2 .

(هـ) V'_1 هى مركبة ضغط الينبوع اللازمة لمعادلة القوة الدافعة الكهربية E'_1 مع هبوط الضغط فى الملفات T'_1 على أساس مرور التيار I'_1 فيها . (و) I'_1 هو التيار اللازم خروجه من الينبوع لإعطاء مركبة التيار I_o فى الملفات T'_1 ، وكذلك لمعـــادلة التأثير المغناطيسى للتيار I_2 ، باعطاء مركبة التيار $-\frac{I_l}{1+\alpha}$ فى نفس هذه الملفات .

الوفر فى نحاس المحول الذاتى :

(Economy in auto — transformer copper)

باعتبار أن I_o تيار صغير يمكن اهماله ، كما هـو معروف بالنسبة للمحـول المعتاد ، فان وجود الاشـارة السالبة فى المعـادلة (١١ — ٨) تعنى أن التيـارين I_1 , I_l متضادان تقريبا فى الإتجاه . وهذا يعنى بالتالى أن قيمة التيـــار I_2 صغيرة ، بالنسبة لقيمة كل من I'_1 , I_l ، وتساوى الفرق بينهما تقريبا ، كما هو واضح فى شكل (٦ — ٨ حـ) . كذلك نظرا لأن α موجبة ، فان المعادلة (١١ — ٨) تشير أيضا ، مع اهمال I_o ، إلى أن قيمة I_l أكبر من قيمة I_1 .

يبين شكلا (د) و (هـ) محولين ، أحدهما تقليدى (هـ) والآخـــر ذاتى (د) ، يقومان بأداء نفس المهمـة بالضبط ، بمعنى أن كلا منهمـا موصـل إلى الينبوع ، الذى ضغطه V_1 ويعطى التيار I_1 ، عندما يكون تيار الحمل I_l ، والضغط على طرفى الملف الثانوى V_2 بحيث يمر فيه التيار I_2 . هذا وبينما يحتوى المحول التقليدى فى (هـ) على T_1 من اللفات فى الملف الابتدائى ، T_2 من اللفات فى الملف الثـانوى ، نجد أن المحول الذاتى فى (د) يحتوى على T_1 من اللفات بين a , c ، بحيث يكون عدد اللفات من a إلى b هو T'_1 ، ومن b إلى c هو $T_2 = (T_1 - T'_1)$ ،

حتى تتحقق العلاقات بين الضغوط فى المحول الذاتى على النحو المطلوب . وفى هذه الحالة يمكننا أن نعتبر ، على وجه التقريب ، أن :

$$V_1 : V'_1 : V_2 = (E'_1 + E_2) : E'_1 : E_2 = T_1 : T'_1 : T_2 \quad (\text{٨}-\text{١٣})$$

كما يمكننا بالنسبة للتيارات والأمبير لفات الناشئة عنها أن نعتبر، على وجه التقريب أيضا ، أن :

$$I_1T_1 = I_2T_2 = I_l\,T_2 \;,\; I_1(T_1 - T_2) = (I_l - I_1)\,T_2 \cdots (\text{٨}-\text{١٤})$$

حيث $I_1\,T_1$ هى الأمبير لفات الملف الابتدائى ، و $I_2\,T_2$ هى الأمبير لفات للملف الثانوى ، فى حالة المحول التقليدى ، كما أن $I'_1T'_1 = I_1(T_1 - T_2)$ هى أمبير لفات الملف الابتدائى و $(I_l - I_1)\,T_2 = I_2\,T_2$ هى أمبير لفات الملف الثانوى ، فى حالة المحول الذاتى . فاذا اعتبرنا أن طول سلك النحاس المستخدم فى الملف يتناسب مع عدد لفاته (باعتبار أن الطول المتوسط للفة واحد فى جميع الأحوال) ، واعتبرنا مساحة مقطع هذا السلك يتناسب مع قيمة التيار المار فيه (باعتبار أن كثافة التيار واحدة فى جميع الملفات) ، نجد أن وزن النحاس ، المستخدم فى أى ملف من هذه الملفات جميعها ، يتناسب مع قيمة الأمبير لفات لكل منها ، وبذلك تكون نسبة وزن النحاس المستخدم فى المحول الذاتى W'_{cu} ، إلى وزن النحاس المستخدم فى المحول التقليدى W_{cu} ، الذى يؤدى نفس المهمة ، هى β ، حيث :

$$\beta = \frac{W'_{cu}}{W_{cu}} = \frac{I_1(T_1 - T_2) + (I_l - I_1)\,T_2}{I_1T_1 + I_2T_2}$$

$$= \frac{2\,(I_l - I_1)\,T_2}{2\,I_l\,T_2}$$

$$\beta = 1 - \frac{I_1}{I_l} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$= \frac{T'_1}{T_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (١٥—٨)$$

عندما تصبح قيمة T'_1 تساوى صفرا ، فان النقطة b ، فى شكل(٦ — ٨ب) تنطبق على النقطة a ، وهذا يعنى أننا أصبحنا فى غير حاجة إلى استخدام المحول مما يفسر معنى أن تكون قيمة β تساوى الصفر ، كما تعطيها المعادلة (١٥ — ٨) ، فى هذه الحالة . كذلك يقل وزن النحاس المستعمل فى المحول الذاتى ، بالنسبة لوزنه فى المحول التقليدى ، الذى يؤدى نفس الغرض ، كما تشير اليه نفس هذه المعادلة ، كلما زادت النسبة $\frac{T_2}{T_1}$ ، بحيث نحصل على قيمة β تساوى صفرا ، مرة أخرى بنفس المعنى السابق ، عندما تصبح T_2 مساوية T_1 ، وهو مايعنى أن T'_1 تساوى صفرا أيضا .

عندما يصبح $V_1 \cong 2V_2$ ، أى أن $\frac{T_2}{T_1} \cong \frac{1}{2}$ ، فان الوفر الناتج فى وزن النحاس يساوى 50 % تقريبا ، على مدى ماسبق شرحه ، وهذا يؤدى إلى وفر فى الثمن الكلى للمحول يتراوح بين 30 % و 35 % . هذا ولا مجال لمناقشة ما يحدث لقيمة الوفر فى ثمن المحول إذا قلت النسبة $\frac{T_2}{T_1}$ عن ذلك كثيرا ، لأن هذه النسبة لايمكن أن تقل عن 0.35 ، بسبب اعتبارات فنية كثيرة تلزم مراعاتها عند تصميم المحولات الذاتية .

قد يكون من المفيد أن نعقد الآن المقارنة بين محولين ، أحدهما تقليدى والآخر ذاتى ، ونستخدم فيهما نفس الوزن من النحاس فى الملفات . وهذا يعنى بمنتهى البساطة أن نأخذ محولا تقليديا ، فنصل الملف الابتدائى والملف الثانوى

على التوالى معا ، كما سبقت الاشارة اليه فى شكل (٦ — ٨ أ) ، لكى نكون محولا ذاتيا ، ونقارنه بعد ذلك بالحالة الأصلية نجد فى هذه الحالة أننا نحتاج إلى ينبوع ضغطه $V_2 + V_1$ يوصل بين a , c ، لكى نحصل على الضغط V_2 بين b , c ، باعتبار أن V_1 هو ضغط الينبوع،اللازم توصيله على الملف الابتدائى فى المحول التقليدى،للحصول على الضغط V_2 على طرفى الملف الثانوى . هذا ويلاحظ أننا نستطيع تحميل المحول الذاتى فى هذه الحالة إلى الحد الذى يؤدى إلى مرور التيار I_1 فى جزء الملفات ab ، والتيار I_2 فى جزء الملفات bc ، وهما تيارا الحمل الكامل فى ملفى المحول التقليدى . يبين الجدول على صفحتى ٤١٤ ، ٤١٥ أوجه المقارنة بين المحولين فى النواحى المختلفة على هذا الأساس ، حيث $\alpha = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$

الدائرة المكافئة للمحول الذاتى :

(Equivalent circuit of the auto — transformer)

إذا كانت Z_o هى معاوقة التمغنط للمحول الذاتى ، فاننا نستطيع الحصول على المعادلة التى تربط بين $\dot{V}_1$ و $\dot{I}_1$ ، وهى التى تحدد ثوابت الدائرة المكافئة للمحول على أساسها ، مع مراعاة جميع الحقائق السابقة ، وذلك على النحو التالى :

$$\dot{V}_2 = \dot{I}_l \dot{Z}_l \quad ,$$

$$\dot{I}_o = \frac{-(\dot{E}_1 + \dot{E}_2)}{\dot{Z}_o} = -\frac{(1+\alpha)\dot{E}_2}{\dot{Z}_o} \quad \dots \quad (٨ - ١٦)$$

بالتعويض من المعادلة (١٦ — ٨) فى المعادلة (١٢ — ٨) نجد أن :

$$\dot{V}_1 = \dot{I}_o \dot{Z}_o + \dot{I}'_1 \dot{Z}'_1 + \dot{I}_2 \dot{Z}_2 \quad \dots\dots \quad (٨ - ١٧)$$

حدود المقارنة	فى المحول التقليدى	فى المحول الذاتى	نسبة : $\frac{\text{الذاتى}}{\text{التقليدى}}$
مفقودات الحديد	P_{Fe}	P_{Fe}	1
مفقودات النحاس	$P_{cu} = I^2_1 R_1 + I^2_2 R_2$	$P_{cu} = I^2_1 R_1 + I^2_2 R_2$	1
المقاومة المكافئة	$R_{1eq} = R_1 + \alpha^2 R_2$	$R_{1eq} = R_1 + \alpha^2 R_2$	1
الممانعة المكافئة	$X_{1eq} = X_1 + \alpha^2 X_2$	$X_{1eq} = X_1 + \alpha^2 X_2$	1
معامل التنظيم عند $\cos \phi$	$\frac{I_1 R_{1eq} \cos \phi + I_1 X_{1eq} \sin \phi}{V_1}$	$\frac{I_1 R_{1eq} \cos \phi + I_1 X_{1eq} \sin \phi}{V_1 + V_2}$	$\frac{\alpha}{1 + \alpha}$
معامل الجودة عند معامل قدرة الوحدة	$\frac{V_2 I_2}{V_2 I_2 + P_{cu} + P_{Fe}}$	$\frac{V_2 I_l}{V_2 I_l + P_{cu} + P_{Fe}}$	أكبر من واحد

حدود المقارنة	فى المحول التقليدى	فى المحول الذاتى	نسبة : الذاتى / التقليدى
نسبة تحويل الضغط من الينبوع	$\alpha \simeq \frac{V_1}{V_2}$	$1 + \alpha \simeq \frac{V_1 + V_2}{V_2}$	$\frac{1+\alpha}{\alpha}$
تيار المدخل	I_1	I_1	1
قدرة المدخل عند معامل قدرة الوحدة	$P_1 = V_1 I_1$	$P_1 = (V_1 + V_2) I_1$	$\frac{1+\alpha}{\alpha}$
تيار المخرج	$I_l = I_2$	$I_l \simeq I_2 + I_1$	$\frac{1+\alpha}{\alpha}$
قدرة المخرج عند معامل قدرة الوحدة	$P_2 = V_2 I_2$	$P_2 = V_2 I_l$	$\frac{1+\alpha}{\alpha}$

وبالتعويض فى المعادلة (١٧ — ٨) عن $\dot{I}_2$ من المعادلة (٩ — ٨) :

$$\dot{V}_1 = \dot{I}_\circ[\dot{Z}_\circ + (1+\alpha)\,\dot{Z}_2] + \dot{I}'_1(\dot{Z}'_1 - \alpha\,\dot{Z}_2) \quad (١٨ - ٨)$$

بالتعويض عن $\dot{V}_2 = \dot{I}_l\,\dot{Z}_l$ فى المعادلة (١١ — ٨ أ) ينتج أن :

$$\dot{V}_2 = \dot{I}_l\ \dot{Z}_l = \dot{E}_2 - \dot{I}_2\,\dot{Z}_2$$

بالتعويض عن $\dot{I}_l$ فى هذه المعادلة ، من المعادلة (١٠ — ٨) ، وعن $\dot{E}_2$ من المعادلة (١٦ — ٨) نجد أن :

$$(\dot{I}_2 - \dot{I}'_1)\,\dot{Z}_l = -\frac{\dot{I}_\circ\,\dot{Z}_\circ}{(1+\alpha)} - \dot{I}_2\,\dot{Z}_2$$

$$\therefore\quad \dot{I}_2\,(\dot{Z}_2 + \dot{Z}_l) = \dot{I}'_1\,\dot{Z}_l - \frac{\dot{I}_\circ\,\dot{Z}_\circ}{(1+\alpha)} \quad \cdots \quad (١٩ - ٨)$$

بالتعويض فى المعادلة (١٩ — ٨) عن $\dot{I}_2$ من المعادلة (٩ — ٨) :

$$\therefore\ [(1+\alpha)\,\dot{I}_\circ - \alpha\,\dot{I}'_1](\dot{Z}_2 + \dot{Z}_l) = \dot{I}'_1\dot{Z}_l - \frac{\dot{I}_\circ\,Z_\circ}{(1+\alpha)}$$

$$\therefore\quad \dot{I}_\circ\left[\frac{\dot{Z}_\circ}{(1+\alpha)} + (1+\alpha)\,\dot{Z}_l + (1+\alpha)\,\dot{Z}_2\right]$$

$$= \dot{I}'_1\,[\dot{Z}_l\,(1+\alpha) + \alpha\,\dot{Z}_2] \quad \cdots\cdots \quad (٢٠ - ٨)$$

بالتعويض عن قيمة $\dot{I}_\circ$ بدلالة $\dot{I}'_1$ فى المعادلة (١٨ — ٨) من المعادلة (٢٠ — ٨) نجد أن :

$$\dot{V}_1 = \dot{I}_1 \left\{ \dot{Z}'_1 - \alpha \dot{Z}_2 + \right.$$

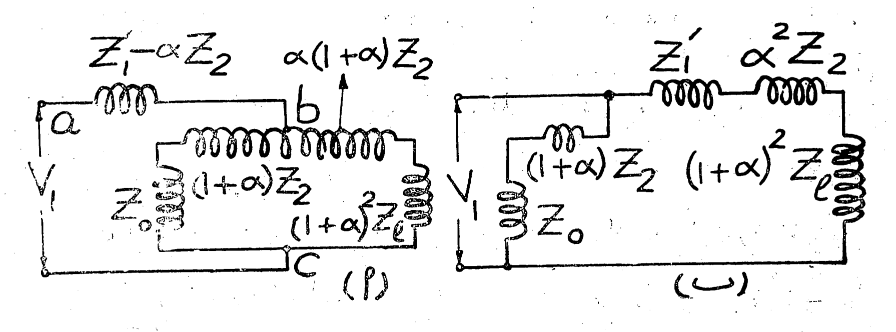
$$\left. + \frac{[\dot{Z}_\circ + (1+\alpha)\dot{Z}_2][\dot{Z}_l (1+\alpha) + \alpha \dot{Z}_2]}{\frac{\dot{Z}_\circ}{(1+\alpha)} + (1+\alpha)\dot{Z}_l + (1+\alpha)\dot{Z}_2} \right\} \quad (٢١ - ٨)$$

يمثل الحـد المضروب فى $\dot{I}_1$ ، الكى يعطى الضغط $\dot{V}_1$ ، فى المعادلة (٢١ – ٨) للمعاوقة المكافئة للمحول الذاتى Z_{eq} ، التى يمكن كتابتها على النحو التالى :

$$Z_{eq} = (\dot{Z}_1 - \alpha \dot{Z}_2)$$

$$+ \frac{1}{\frac{1}{\dot{Z}_\circ + (1+\alpha)\dot{Z}_2} + \frac{1}{(1+\alpha)^2 \dot{Z}_l + \alpha(1+\alpha)\dot{Z}_2}} \quad (٢٢-٨)$$

توضح كل من المعادلتين (٢١ – ٨) ، (٢٢ – ٨) أن المعاوقة المكافئة المحول الذاتى Z_{eq} تتكون من المعاوقة ($\dot{Z}'_1 - \alpha \dot{Z}_2$) ، التى تتصل عـلى التوالى مـع معاوقتين متصلتين معا عـلى التوازى ، وهما $\dot{Z}_\circ + (1+\alpha)\dot{Z}_2$ والمعـاوقة $(1+\alpha)^2 \dot{Z}_l + (1+\alpha)\alpha \dot{Z}_2$ ، وذلك كما هو مبين فى شكل (٨ – ٨أ).
فاذا راعينا أن معـــاوقة التمغطس أو التنبيه (exciting Impedance) تكون



شكل (٧ – ٨)

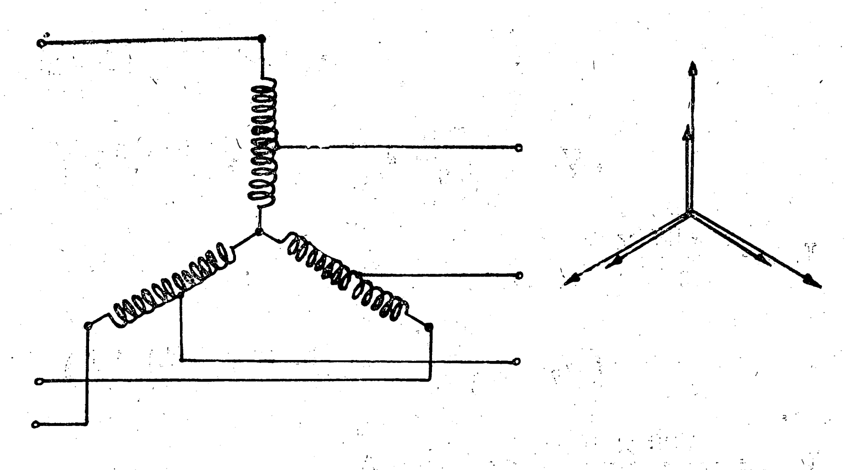
كبيرة جداً بالنسبة لكل من المعاوقات $\dot{Z}'_1$, $\dot{Z}_2$, $\dot{Z}_l$ ، فاننا نستطيع تبسيط الدائرة بنقل المعاوقة $(1 + \alpha\dot{Z}_2) + \dot{Z}_o$ بحيث تصبح موصلة على الينبوع مباشرة كما فعلنا فى الدائرة المكافئة للمحول التقليدى ، فنحصل على دائرة مكافئة تقريبية ، تفى بالغرض بالنسبة لإحتياجاتنا، كما هو مبين فى شكل (٧ – ٨ب) .

لإستخدام الدائرة المكافئة التقريبية ، المبينة فى شكل (٧ – ٨ب) ، فى الحسابات الخاصة بالمحول الذاتى ، مثل حساب معامل التنظيم وحساب معامل الجودة ، يمكننا أن نستفيد من القوانين التى استنبطناها على أساس الدائرة المكافئة للمحول التقليدى ، منسوبة إلى الملف الابتدائى ، مع مراعاة أن نقل المقاومة ومعانعة التسرب فى الملفات T_2 إلى ناحية الينبوع يكون باستعمال النسبة $\alpha = \frac{T'_1}{T_2}$ ، بينما تكون تحويلات الضغط والتيار ، وبالتالى معاوقة الحمل Z_l ، من ناحية الحمل إلى ناحية الينبوع ، باستعمال النسبة $\frac{T_1}{T_2} = (1 + \alpha)$ ، أو معكوسها .
أما بالنسبة لتيار اللاحمل I_o ، ومركبتيه I_{oa} ، I_{ou} فاننا نستخدم المعاوقة $Z_o + (1 + \alpha) Z_2$ ، بدلا من Z_o فقط فى حالة المحول التقليدى .

المحولات الذاتية ثلاثية المراحل :

(3 – phase auto — transformers)

يمكننا الحصول على محول ذاتى ثلاثى المراحل ، باستخدام نقط تقسيم على الملفات الإبتدائية فى المحول التقليدى ، بنفس الطريقة ، بالنسبة للمراحل الثلاث ، التى اتبعت بالنسبة للملف الإبتدائى ، فى حالة المحول مفرد المرحلة .
يبين شكل (٨ – ٨ أ) ملفات محول ثلاثى المراحل موصل نجمة ، كما يبين شكل



شكل (٨ — ٨)

(٨ — ٨ب) ضغوط المراحل الثلاث ، فى هذه الحالة . وأغلب هذه المحولات توصل نجمة ، وتستخدم فى بعض الأغراض الخاصة ، مثل بدء المحركات التأثيرية ، كما سوف يأتى ذكره فيما بعد . هذا وعند حساب مثل هذه المحولات تتبع جميع القوانين والقواعد التى تم استنباطها بالنسبة للمرحلة الواحدة ، مع مراعاة قيم الضغط المرحلى والتيار المرحلى والقدرة المرحلية ، فى حالة المحول ثلاثى المراحل .

مثال (١) :

Find the values of the currents flowing in the various branches of a 3 — phase, star — connected auto — transformer loaded with 500 KW at 0 8 power factor lagging and having a ratio of 440/500 V Neglect voltage drops and all losses in the transformer, also the magnetising current

بالرجوع إلى الرموز المبينة فى شكل (٦ — ٨ب) ، وبالنسبة للتيارات

والضغوط المرحلية ، نجد أن :

(التيار الخطى أو المرحلى ناحية $V_1 = \frac{500}{\sqrt{3}}$)

$$I_1 = \frac{500 \times 1000}{\sqrt{3} \times 500 \times 0.8} = 722 \text{ A}$$

(التيار الخطى أو المرحلى ناحية $V_2 = \frac{440}{\sqrt{3}}$)

$$I_l = \frac{500 \times 1000}{\sqrt{3} \times 440 \times 0.8} = 820 \text{ A}$$

التيار I'_1 فى جزء الملفات T'_1 هو نفس التيار I_1 ، حيث $I'_1 = 722$ A

أما التيار I_2 فى جزء الملفات T_2 ، فهو يساوى الفرق بين I_l و I_1 تقريبا ، كما سبق ذكره ، حيث :

$$I_2 \cong I_l - I_1 \cong 820 - 722 = 98 \text{ A}$$

مثال (٢) :

A10KVA, 2300/230 V transformer, tested on open circuit, takes 1.09 A and 100 W when supplied at 230 V. With the low voltage coil short — circuited, 79.5 V applied to the high — voltage winding produces a current of 5.0 A, and the power consumed is 196 W. The primary and secondary windings are each wound in two equal sections, the low voltage coils being in series for 230 V operation. It is desired to reconnect as an autotransformer to raise 2300 V to 2415 V and to deliver the maximum amount of powet without

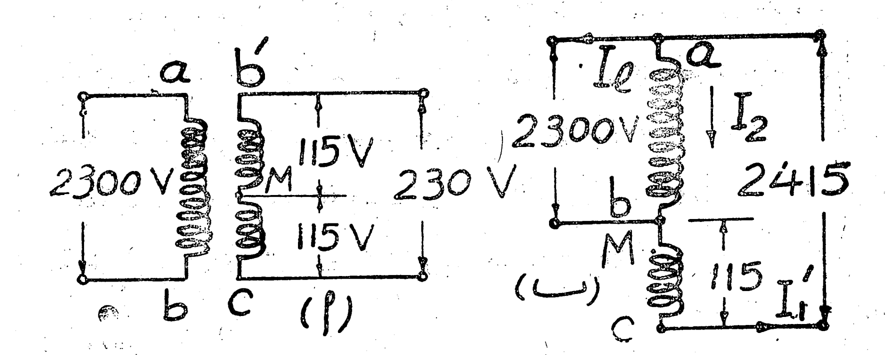
overheating. What will be the efficiency and KVA rating under this condition ?

نعين أولا بعض الحدود الخاصة بالمحول التقليدى :

$$\alpha = \frac{V_1}{V_2} = \frac{2300}{230} = 10$$

$$I_1 = \frac{10 \times 1000}{2300} = 4.35 \text{ A} \quad , \quad I_2 = 43.5 \text{ A}$$

$P_{Fe} \cong 100$ W (مفقودات الحديد)



شكل (٩ — ٨)

يبين شكل (٩ — ٨ أ) المحول التقليدى المعطى ، بينما يبين شكل (٩ — ٨ ب) المحول الذاتى باعتبار ناحية الضغط العالى هى الملف الابتدائى ، وناحية الينبوع هى الملف الثانوى، حتى تتمشى الرموز المستخدمة مع ما جاء فى شكل (٦ — ٨). هذا ونستطيع إعادة التوصيـل كمحول ذاتى لرفع الضغط من 2300 V إلى 2415 V بتوصيل b مع M ، فنحصـل على 2415 V بين a , c ، عند توصيل ينبوع ضغطه 2300 V بين a , b وتكون أقصى قيمة للتيار الذى تتحمله

الملفات بين M , c هى $I'_1 = 43.5\ A$ ، بينما لا تتحمل الملفات بين a و b أكثر من $I_2 = 4.35\ A$ ، مما يجعلنا نستطيع الحصول على أقصى قيمة للتيار من الينبوع $I_l \cong I'_1 + I_2 \cong 47.85\ A$. نجد فى هذه الحالة أن :

$$KVA_l = 47.85 \times 2300 \times 10^{-3} = 11$$

$$KVA_1 = 43.5 \times 2415 \times 10^{-3} = 10.5$$

وعلى هذا الأساس نستطيع أن نعتبر أن أكبر قدرة مخرج للمحول لا يجب أن تزيد عن 10.5 KVA ناحية الضغط 2415 V . فاذا أردنا الحصول على معامل الجودة المناظر ، مع إعتبار أن معامل القدرة الوحدة ، نستطيع أن نفترض أن المفقودات الحديدية تظل كما هى وتساوى 100 W ، بينما تنخفض قيمة مفقودات النحاس بمقدار الربع ، لاستخدامنا نصف الملف الثانوى فقط ، وذلك باعتبار أن مفقودات النحاس موزعة بالتساوى بين الملفين الابتدائى والثانوى فى المحول التقليدى ، أى أن $P_{cu} = 147\ W$ تقريبا . لذلك نجد أن :

معامل الجودة :

$$\eta = \frac{10.5}{10.5 + 0.1 + 0.147} = 0.977$$

الملف الثالث : (Tertiary winding)

قد يزود المحول ، فى حالات معينة ، بملف ثالث ، علاوة على الملفين الابتدائى والثانوى ، وذلك لإستخدامه فى الأغراض الآتية :

١ — تغذية حمل مستقل يراد عزله عن الملف الثانوى .

٢ — توصيل المكثفات ، التى تستخدم بقصد تحسين معامل القدرة ، على

هذا الملف ، وذلك عندما يكون كل من الضغط الابتدائى، والضغط الثانوى، غير مناسب لتغذية هذه المكثفات . أو عندما يراد توصيل المكثفات على نحو يختلف عن طريقة توصيل الملفات ، كأن يكون هذا التوصيل نجمة ، وينبغى توصيل المكثفات دلتا مثلا .

٣ — فى المحولات ثلاثية المراحل ، الموصلة نجمة/نجمة ، للتكفل بالتوافقية الثالثة فى تيار مغطسة المحول ، والاحمال غير المتوازنة ، ثم التحكم فى تيارات القصر ، التى قد تنشأ لأى سبب من الاسباب .

ويكون توصيل الملفات الثالثة ، فى المحولات ثلاثية المراحل ، على شكل دلتا عادة . فاذا حدث أى خطأ تنجم عنه دائرة قصر فى الملفات الابتدائية أو الثانوية للمحول ، (وخاصة عند اتصال الخطوط بالأرض) ، فقد ينشأ اختلال ملحوظ فى توازن الضغوط المرحلية ، مما يتسبب فى مرور تيارات محلية كبيرة فى الملفات الثالثة . وهذا يستدعى إعداد هذه الملفات بمانعات تسرب كبيرة ، بحيث يمكن أن تحد من قيمة التيارات التى تمر ، فى مثل هذه الأحوال ، حتى لاتتسبب فى زيادة تسخين الملفات إلى حد الخطورة .

التيار الابتدائى فى محول يحتوى على ملف ثالث :

من الواضح أننا نستطيع الحصول على التيار الابتدائى ، فى هذه الحالة ، بجمع متجهات الأمبير لفات المغطسة مع كل من أمبير لفات الملف الثانوى وأمبير لفات الملف الثالث ، أو بجمع التيارات الثلاثة المناظرة ، على أن تكون جميعها منسوبة للملف الابتدائى . فيما يلى مثال يوضح ذلك :

مثال :

A 3300/200/110 V, star/star/delta, 3 — phase transformer has a magnetising current of 8.7 A, aud balanced 3 — phase loads of 800 KVA at 0.8 lagging on the secondary and 180 KVA at 0.6 leading on the tertiary. Find the primary current and power factor.

باعتبار التيارات جميعها منسوبة للماف الابتدائى ، وأخذ الضغط الابتدائى كمحور مرجعى ، وفرض أن التيار الثانوى I'_2 ، وتيار الملف الثالث I'_3 ، نجد أن :

$$\dot{I}_o = -j\,8.7$$

$$-\dot{I}'_2 = \frac{800 \times 1000}{\sqrt{3} \times 3300} \underline{|- \cos^{-1} 0.8}$$

$$= 140 \underline{|-36.9^\circ} = 112 - j\,84 \text{ A}$$

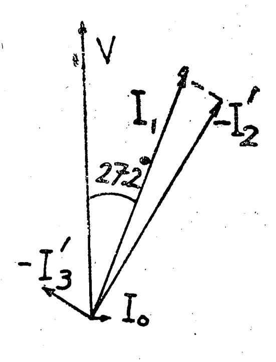
$$-\dot{I}'_3 = \frac{180 \times 1000}{\sqrt{3} \times 3300} \underline{|\cos^{-1} 0.6}$$

$$= 31.5 \underline{|53.1^\circ} = 18.9 + j25.2$$

بجمع هذه التيارات ، كما هو مبين فى شكل (٩ — ٨ ح) ، نحصل على التيار الابتدائى I_1 .

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 - \dot{I}'_3 + \dot{I}_o = -j\,8.7 + 112 - j\,84 + 18.9 + j\,25.2$$

$$\dot{I}_1 = 130.9 - j\,67.2 = 147 \underline{|-27.2^\circ}$$



شكل (٩ — ٨ح)

باعتبار الكيلو فولت أمبير فى الملف الابتدائى Q_1 ، والقدرة بالكيلووات KW_1 فى هذا الملف و KW_2 فى الملف الثانوى و KW_3 فى الملف الثالث ، يجب أن يكون KW_1 مساويا لمجموع KW_2 و KW_3 ، وهذه طريقة للمراجعة على صحة النتائج التى حصلنا عليها .

$$Q_1 = \sqrt{3} \times 3300 \times 147 \times 10^{-3} = 842 \text{ KVA}$$

$$KW_1 = 842 \cos 27.2 = 748$$

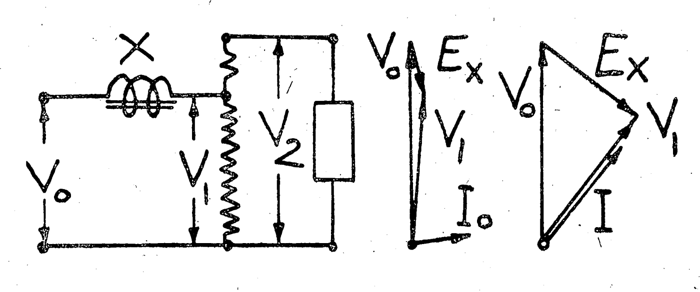
$$KW_2 = 800 \times 0.8 = 640 \quad , \quad KW_3 = 180 \times 0.6 = 108$$

$$KW_2 + KW_3 = 640 + 108 = 748 = KW_1$$

تنظيم الضغط باستخدام المحولات :

(Voltage control using transformers)

تستخدم المحولات ، فى بعض الأحيان ، فى تنظيم الضغط فى حدود ضيقة ، وذلك علاوة على عملها الرئيسى فى تحويل الضغط . وأبسط طريقة لذلك تكون باستخدام ممانعة X ، موصلة على التوالى مع الينبوع ، كما هو مبين فى شكل (١٠ — ٨) . ويكون هبوط الضغط فى الممانعة ، فى هذه الحالة ، هو العامل الذى



شكل (١٠ — ٨)

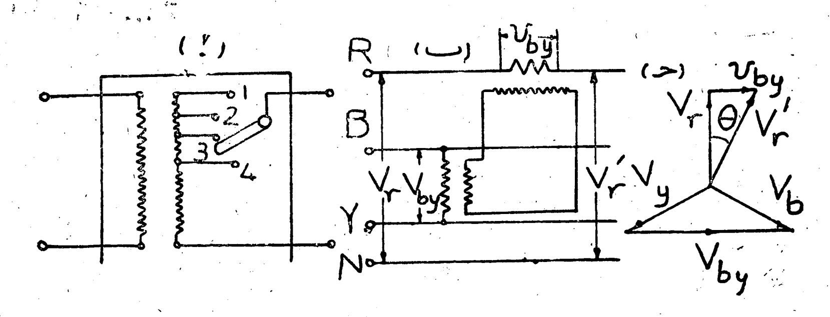
يتوقف عليه تغيير الضغط V_1 ، وبالتالى ضغط الخرج V_2 . ويستخدم فى هذه الطريقة عادة محول ذاتى مع الممانع X ، ويتوقف مقدار تنظيم الضغط على قيمة الحمل ، ومعامل قدرته ، كما هو واضح فى شكل (١٠ — ٨) .

يمكن الاستعاضة عن الممانع باستخدام محول اضافة (booster transformer) كما هو مبين فى شكل (١١ — ٨ب) . ويلاحظ أنه يمكننا التحكم فى زاويه الاختلاف المرحلى θ بين V_r و V'_r عن طريق تغيير قيمة v_{by} ، وذلك باستخدام نسبة تحويل مختلفة لمحول الاضافة . ومن الواضح أن هذه الطريقة مناسبة للاستخدام مع المحولات ثلاثية المراحل ، حيث يمكن تغذية محول الاضافة فى كل مرحلة بين خطى المرحلتين الآخرتين ، للحصول على الضغط المناسب ، لعمل التغيير المطلوب .

تنظيم الضغط بتغيير نقطة التقسيم :

(Voltage control by tap — changing)

يمكن عن طريق تغيير عدد اللفات ، فى أحد الملفين الابتدائى أو الثانوى ، تغيير نسبة تحويل الضغط ، والحصول بالتالى على ضغط متغير . ويتم ذلك عن طريق عمل نقط تقسيم (tapping points) على الملف ، بحيث يعطى التوصيل



شكل (١١ — ٨)

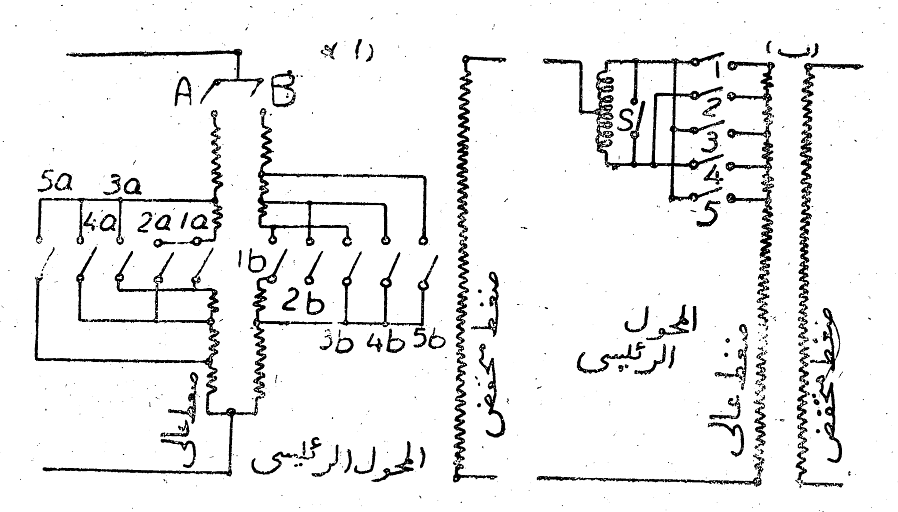
عند كل نقطة منها ضغطا مختلفا . يبين شكل (١١ — ٨ أ) محولا به أربع نقط تقسيم فى الملف الثانوى (4 , 3 , 2 , 1) ، يعطى التوصيل عليها أربعة ضغوط مختلفة (ومتقاربة بطبيعة الحال) . وليس من الضرورى أن تكون نقط التقسيم عند الطرف الخارج للملف ، كما هو مبين فى الشكل ، إذ يمكن عملها فى منتصف الملف ، وكذلك ناحية نقطة التعادل (فى الملفات ثلاثية المراحل) . هذا ، ويتم عمل التقسيم فى الغالب على ملف الضغط العالى ، للأسباب الآتية :

١ — أن ملف الضغط العالى هو الملف الخارجى (يكون موضع ملف الضغط المنخفض ناحية القلب الحديدى) فيسهل بذلك الوصول إلى نقط التقسيم عليه .

٢ — أن كثرة عدد اللفات (نسبيا) فى ملف الضغط العالى يجعل من السهل تغيير الضغط فى حدود متقاربة جدا ، مع فرصة امكان تغيير عدد اللفات ، لهذا الغرض ، بمقدار لفة واحدة فقط .

٣ — أن التيار فى ملف الضغط العالى يكون صغيراً بالنسبة للتيار فى ملف الضغط المنخفض ، مما يجعل عمل التوصيلات ، والتلامسات الخاصة بنقط التقسيم ،

أكثر سهولة .



شكل (١٢ — ٨)

وقد يكون المحول معداً على أساس التغيير على نقط التقسيم فى حالة اللاحمل (off – load tap — changing) ، كما أن الامر قد يستلزم التغيير على نقط التقسيم فى أثناء وجود الحمل (on — load tap — changing) ، حيث يجب اتخاذ احتياطات معينة ، تتمثل فى استخدام مثل الطرق الآتية :

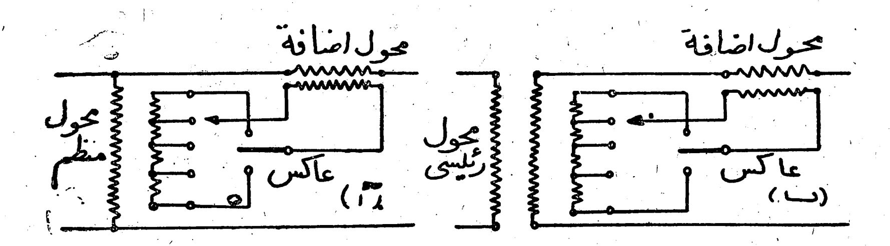
ا — استخدام مسارين متوازيين :

إذا أمكن إعداد الملف المحتوى على نقط التقسيم من مسارين متوازيين ، فانه يمكن تحميل أحدهما بالحمل كله ، وقطع التيار عن الآخر ، وذلك فى أثناء التغيير على نقط التقسيم فيه . يبين شكل (١٢ — ٨ أ) محولا ، يحتوى ملف الضغط العالى فيه على مسارين متوازيين ، ويتم إجراء التغيير فى نقط تقسيمه على النحو التالى : عندما يكون المحول عاملا على نقطتى التقسيم 1b,1a فى ملف الضغط العالى ، يكون المفتاحان A , B مقفلين . يفتح أحد المفتاحين ، وليكن A ،

فيصبح الحمل بأكمله فى المسار الذى يحتوى على المفتاح B ، فيتم النقل من نقطة التقسيم 1a ، بفتح المفتاح الخاص بها ، إلى نقطة التقسيم 2a ، بقفل المفتاح الخاص بها . ثم يقفل A ويفتح B لعمل التغيير المناظر . وعند قفل B بعد ذلك يصبح المحول عاملا على نقطتى التقسيم 2a,2b . ويلاحظ أنه فى منتصف فترة التغيير ، عندما يكون كلا من B, A مقفلين ، والمحول موصل على نقطة التقسيم 2a فى مسار و 1b فى المسار الآخر ، يمر تيار محلى بين الملفات ، زيادة على التيار الأصلى . ولتقليل قيمة هذا التيار المحلى على قدر الإمكان تستخدم عانقة ، يكون موضعها فى مسار هذا التيار ، بحيث تكبر معاوقته . كما هو مبين فى شكل (١٢ — ٨ب) .

(ب) استخدام محول منظم :

يقوم هذا المحول بمهمة تغيير الضغط فى الحدود المطلوبة ، بحيث لانحتاج إلى عمل نقط تقسيم على المحول الرئيسى ، ويستخدم فى هذه الحالة محول اضافة ، كما هو مبين فى شكل (١٣ — ٨ أ) . هذا ويمكن عمل نقط التقسيم ، اللازمة لتنظيم



شكل (١٣ — ٨)

الضغط على ملف ثالث فى المحول الرئيسى نفسه ، بدلا من استخدام محول منظم قائم بذاته ، شكل (١٣ — ٨ب)

ثانياً – تشغيل المحولات على التوازى

نحتاج فى بعض الأحيان إلى استخدام أكثر من محول واحد لتشغيل حمل كبير ، لا يمكن أن يقوم به محول واحد من المحولات التى يسهل الحصول عليها . ولا يتعدى الأمر ، فى أغلب الأحوال ، الحاجة إلى توصيل محولين على التوازى ، من ناحيتى الضغط العالى والضغط المنخفض . لذلك سوف يقتصر التحليل الآتى على هذه الحالة فقط . ويمكن الإستفادة بهذا التحليل ، والسير على نمطه ، فى غير ذلك من الحالات الطارئة . هذا ونظراً لأن الأصل فى التحليلات المختلفة هو اعتبار القيم المرحلية عادة ، فسوف نبدأ بدراسة الموضوع بالنسبة للمحولات مفردة المرحلة ، على أن يستفاد بالنظريات والقواعد التى نحصل عليها فى تحليل المحولات ثلاثية المراحل ، على أساس الدراسة بالنسبة لكل مرحلة فيها . وإلى جانب ذلك يجب دراسة تأثير توصيلات المراحل المختلفة ، فى مثل هذه المحولات ، على مدى امكانية تشغيلها على التوازى معاً . وسوف يتضح لنا فيما بعد أن هناك توصيلات معينة فقط للمحولات ثلاثية المراحل ، يمكن معها توصيلها على التوازى ، حيث يمتنع توصيلها فى غير ذلك من الحالات .

شروط تشغيل المحولات على التوازى :

يجب أن تتوفر عدة شروط قبل أن نستطيع توصيل محولين على التوازى معاً . وهذا ينطبق على حالة المحولات مفردة المرحلة ، وبالنسبة للقيم المرحلية فى المحولات ثلاثية المراحل . ويزيد على هذه الشروط نوعية توصيل المراحل ، بالنسبة لهذا النوع الأخير من المحولات ، كما سبق ذكره . وإلى جانب ذلك كله يوجد شرط عام ، يجب ألا نغفله ، وهو يختص بتشغيل أى نوعين من الآلات على التوازى . وينص هذا الشرط على أن تكون قدرتا الآلتين ، المراد تشغيلهما

على التوازى ، متقاربتين على قدر الإمكان ، حيث لا يوجد ما يمنع من تشغيل آلتين على التوازى بسبب اختلاف قدرتيهما . والحكمة فى هذا الشرط ألا يؤدى أى اختلاف صغير، فى تحميل الآلة الكبيرة، إلى القاء عبء متزايد ، قد يؤدى إلى حدوث حالة تعدى الحمل ، على الآلة الصغيرة ، وذلك عند تشغيل آلتين على التوازى ، تختلف قدراتهما اختلافا كبيرا . وشروط تشغيل المحولات على التوازى هى :

١ — أن تمتلك نفس نسبة تحويل الضغط .

٢ — أن يكون هبوط الضغط النسبى متساويا فى كل منها عدديا، ومتوافقا مرحليا .

٣ — أن تراعى قطبية الأطراف عند توصيلها ، فتوصل الأطراف ذوات القطبية المتماثلة معا .

٤ — أن يراعى توافق التعاقب المرحلى، بالنسبة للمحول ثلاثية المراحل :
وفيما يلى نبذة صغيرة عن كل شرط من هذه الشروط .

نسبة تحويل الضغط :

إن اتفاق نسبة تحويل الضغط ، فى محولين يعملان على التوازى ، يجعلنا نحصل على نفس الضغط على طرفى كل من ملفى الضغط الثانويين فى المحولين ، فى حالة عدم وجود الحمل ، عند توصيل ملفيهما الابتدائيين على التوازى على ينبوع واحد . وهذا يمنع مرور تيارات محلية بين الملفين الثانويين ، تلك التيارات التى تزداد قيمتها كلما ازداد مقدار الاختلاف بين نسبتى تحويل الضغط فى المحولين ، وازداد تبعاً لذلك فرق الضغط على طرفى الملفين الثانويين . ويكون

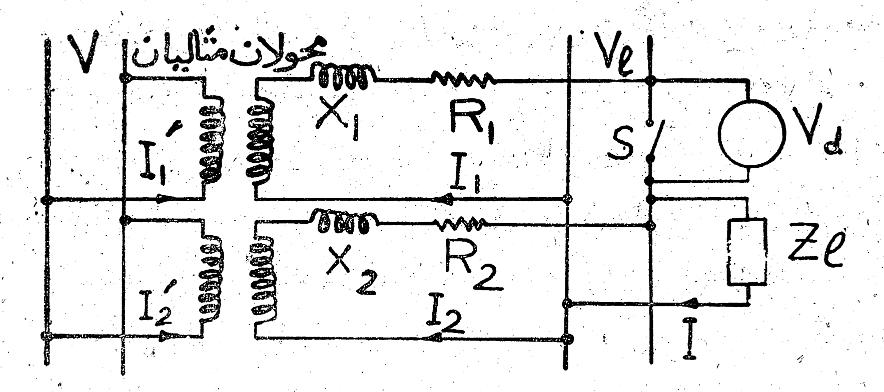
مرور التيار المحلى بين هذين الملفين ، عند تحميل المحولين ، بحيث يكون فى إتجاه تيار الحمل فى أحدهما ، وفى عكس إتجاه تيار الحمل فى الآخر ، مما قد يؤدى إلى تعدى الحمل بالنسبة للأول ، عندما يكون توزيع الحمل الكلى بين المحولين بحيث يتم تحميل كل منها بحمله الكامل . هذا إلى جانب وجود مفاقيد نحاسية زائدة بسبب وجود التيارات المحلية فى حالة عدم وجود الحمل . ومما يزيد من أهمية هذه التيارات أن الدائرة المحلية التى تمر فيها تحتوى على معاوقتى المحولين على التوالى ، وهما صغيرتان جدا كما هو معلوم .

هبوط الضغط النسبى فى المحولين :

يستلزم توصيل الملفين الابتدائيين ، للمحولين العاملين على التوازى ، إلى نفس الينبوع ، واشتراك الملفين الثانويين فى الضغط على طرفى الحمل ، أن يكون معامل التنظيم واحدا فى المحولين . وهذا يعنى أن يتساوى هبوط الضغط IZ فى المحولين فى القيمة ، وفى الاتجاه أيضا ، كما سبق ذكره . وليس من الضرورى أن تتساوى المقاومتان والممانعتان ، كل على حدة ، فى المحولين فى هذه الحالة. ويترتب على اختلاف نسبة الممانعة إلى المقاومة عدم تساوى زاوية الاختلاف المرحلى للتيار بالنسبة للضغط الطرفى على الحمل ، فى كل من المحولين .

قطبية الاطراف :

يراعى توصيل الأطراف ، التى لها نفس القطبية ، معاً . وينشأ عن وجود خطأ فى القطبية عند التوصيل ، أن يصبح الملفان الثانويان مقصورين بضعف الضغط ، مما يتسبب فى مرور تيار قصر هائل قبل التوصيل إلى الحمل . لذلك يجب التحقق من صحة التوصيل ، بالنسبة للقطبية ، قبل أن يصبح الملفان الثانويان متصلين على التوازى معا على طرفى الحمل ، ويكون ذلك بوضع مفتاح S بينهما



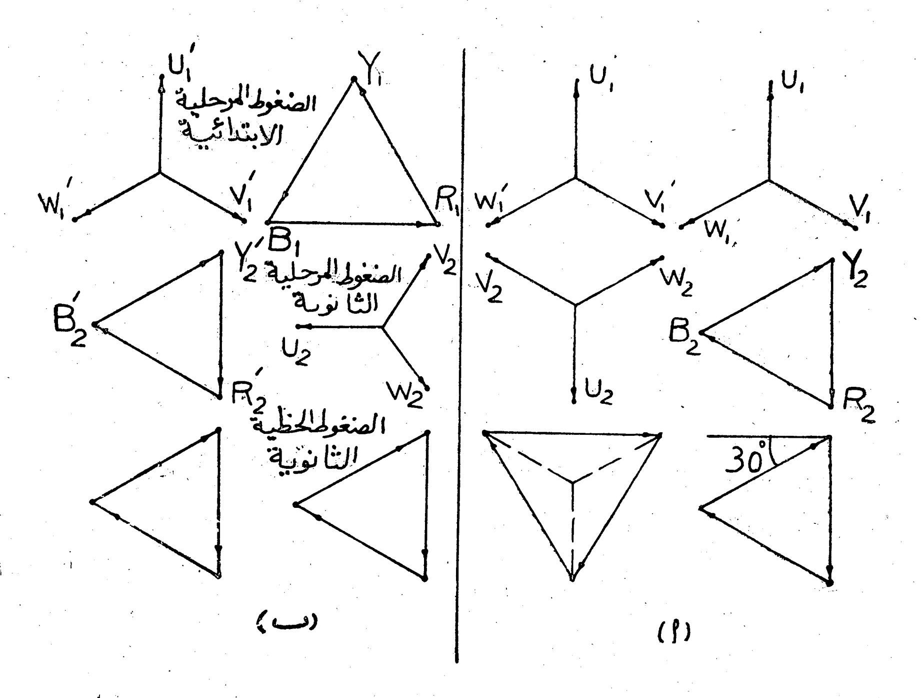
شكل (١٤ — ٨)

وتوصيل فولتمتر على طرفيه ، كما هو مبين فى شكل (١٤ — ٨) . يمكن قفل المفتاح عندما يقرأ الفولتمتر صفرا ، كما أنه يجب عكس قطبية الأطراف قبل توصيل المفتاح ، إذا قرأ الفولتمتر ضعف الضغط الثانوى ، ثم التأكد من أنه أصبح يقرأ صفراً .

تعاقب المراحل :

يراعى بالنسبة للمحولات ثلاثية المراحل أن يكون تعاقب المراحل متماثلا فى المحولين ، وإلا فسوف تحدث دائرة قصر بين كل مرحلتين فى خلال كل دورة . فاذا أردنا توصيل أطراف الملفات الثانوية الثلاثة u_2 , v_2 , w_2 لمحول ، مع أطراف الملفات الثانوية الثلاثة u'_2 , v'_2 , w'_2 لمحول يعمل معه التوازى ، يوصل أولا الطرف u'_2 مع الطرف u_2 ، فاذا ظهرت قيمة للضغط بين v_2 , v'_2 ، أو w_2 و w'_2 فان هذا يعنى أن التعاقب المرحلى لأحد المحولين يختلف عن الآخر . ويتم التأكد من ذلك بقياس الضغط بين u_2 , v'_2 أو u'_2 , v_2 ، فيكون مساويا للصفر فى هذه الحالة . ويكون اصلاح الخطأ باستبدال توصيل طرفين من أطراف أحد المحولين مع الطرفين المناظرين للمحول الآخر . ويرتبط بموضوع التعاقب المرحلى فى

المحولات ثلاثية المراحل، موضوع الإختلاف المرحلى فى الضغوط الثانوية المتناظرة للمحولين ، عند توصيلهما على التوازى ، نتيجة لعدم التماثل فى توصيل المراحل فى المحولين . وتجد لهذا السبب أن هناك أنواعا معينة محدودة ، من التوصيلات غير المتماثلة ، يصح معها توصيل المحولين على التوازى معا . وفى هذه الحالة تكون الضغوط الثانوية المتناظرة متفقة معا مرحليا (علاوة على اتفاقها فى القيمة) على الرغم من تباين التوصيلات الداخلية فى المحولين . وعلى العموم يجب مراجعة العلاقة بين الضغوط الثانوية المتناظرة من حيث القيمة والاتجاه ، عندما تختلف التوصيلات الداخلية بين المراحل فى المحولين ، وذلك قبل الحكم على صلاحيتهما للعمل على التوازى معا . ويمتنع تشغيلهما على التوازى عند وجـــود اختلاف مرحلى بين الضغوط المتناظرة ، أما اذا اختلفت هذه الضغوط فى القيمة ، فيمكن



شكل (١٥ — ٨)

معالجة ذلك بضبط نسبة التحويل فى أحد المحولين ، باستخدام نقط تقسيم على الملفات لهذا الغرض ، بحيث نحصل على نفس قيمة الضغط الثانوى فى المحولين.

ويراعى ، عند مراجعة التماثل المرحلى بين الضغوط الثانوية ، أن الضغط الثانوى لأية مرحلة يختلف مرحليا بمقدار 180 درجة عن ضغط الينبوع الموصل إلى الملف الابتدائى لنفس المرحلة .

نورد فيما يلى بعض التوصيلات التقليدية غير المتماثلة التى يصح معها التوصيل على التوازى :

المحول الأول : نجمة/نجمة　　نجمة/دلتا　　نجمة/دلتا

المحول الثانى : دلتا/دلتا　　دلتا/نجمة　　نجمة/متداخل*

شكل (١٦ — ٨)

---

* التوصيل المتداخل (Zigzag connection) للملفات الثانوية مبين فى شكل (١١ — ٨)

ويبين شكل (١٥ — ٨ب) ، (١٦ — ٨ أ ، ب) كيف تتفق الضغوط الثانوية المتناظرة مرحليا ، وفى القيمة أيضا ، على الرغم من اختلاف التوصيلات المرحلية فى المحولين . كذلك يبين شكل (١٥ — ٨ أ) كيف تختلف الضغوط الثانوية بسبب اختلاف التوصيلات المرحلية فى المحولين .

توزيع الحمل (أو التيار) بين محولين على التوازى :

(Distribution of load (or current) between two transformers working in parallel)

عند تشغيل المحولين على التوازى يوصل الملفان الابتدائيان ، على الينبوع الذى ضغطه V ، على التوازى معا . ويوصل الملفان الثانويان مع الحمل ، على التوازى معا ، حيث يكون الضغط المشترك على طرفى كل منهما ، وعلى طرفى الحمل أيضا ، V_1 كما هو مبين فى شكل (١٤ — ٨) . وسوف نستعين بالدائرتين المكافئتين للمحولين ، منسوبتين إلى ناحية الضغط العالى ، أو ناحية الضغط المنخفض ، وهى ناحية الحمل عادة ، عند عمل الحسابات الخاصة بتوزيع الحمل أو التيار . وسوف نفترض لذلك أن المقاومة المكافئة (فى حالة المحول مفرد المرحلة) ، أو المقاومة المرحلية المكافئة (فى حالة المحول ثلاثى المراحل) ، منسوبة إلى ناحية الحمل ، هى R_1 للمحول الاول ، و R_2 للمحول الثانى . وأن ممانعة التسرب المناظرة هى X_1 للمحول الاول ، و X_2 للمحول الثانى . ويكون تيار الحمل الكلى I ، يخص المحول الأول منه التيار I_1 ، ويخص المحول الثانى I_2 . كما يكون تيار الينبوع الخاص بالمحول الأول I'_1 ، وتيار الينبوع الخاص بالمحول الثانى I_2 ، يتم تحويلهما باستخدام محولين مثاليين ، كما هو مبين فى شكل (١٤ — ٨) . فاذا فرضنا أن نسبة تحويل المحول الاول a_1 ، ونسبة تحويل المحول الثانى هى a_2 نجد أننا

بحاجة إلى دراسة توزيع الحمل بين المحولين فى حالتين أساسيتين ، وذلك عندما تتساوى α_1 مع α_2 ، ثم عندما تختلفان اختلافا طفيفا .

١ — توزيع الحمل عندما تتساوى نسبتا التحويل فى المحولين :

يكون هبوط الضغط فى المحول الأول مساويا فى القيمة ، ومتفقا مرحليا ، مع هبوط الضغط فى المحول الثانى ، وهذه نتيجة حتمية لتساوى الضغط على طرفى كل من الملفين الابتدائيين ، والملفين الثانويين ، فى هذه الحالة . ويمكن التعبير عن هذه الحقيقة الواقعة بالمعادلة الآتية ، التى سوف تتخذ أساسا للحساب بعد ذلك :

$$\dot{v} = \dot{I}_1 \dot{Z}_1 = \dot{I}_2 \dot{Z}_2 = \dot{I}\ \dot{Z} = (\dot{I}_1 + \dot{I}_2)\ \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad \cdots (٨-٢٣)$$

حيث :

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad , \quad \dot{Z} = \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad , \quad \dot{I} = I \underline{|\Phi}$$

$$\dot{Z}_1 = R_1 + j X_1 \quad , \quad \dot{Z}_2 = R_2 + j X_2$$

وينتج من ذلك أن :

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{v}}{\dot{Z}_1} = \dot{I}\ \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = I_1 \underline{|\Phi_1}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{v}}{\dot{Z}_2} = \dot{I}\ \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = I_2 \underline{|\Phi_2} \quad \cdots\ \cdots (٨-٢٤)$$

وهذا يعنى أن التيار يوزع بين المحولين بالنسبة العكسية لمعاوقتى التسرب فيهما ، فيأخذ المحول ذو المعاوقة الأكبر التيار الأصغر ، وبالعكس . وتجب مراعاة ذلك عند توصيل محولين على التوازى معا ، فلا تكون معاوقتاهما مختلفتين اختلافا بينا ، ويكون حجماهما بالتالى متفاوتين تفاوتا كبيرا ، كما سبق ذكره.

ونظراً لأن الضغط V_l واحد بالنسبة للحمل ، ولكل من الملفين الثانويين معا ، يمكن ، بضرب المعادلات السابقة فى قيمة هذا الضغط ، أن تحصل على توزيع الحمل الكلى بالكيلو فولت أمبير Q (باعتباره كمية موجهة نتيجة لضرب متجه التيار فى قيمة الضغط) على المحولين على النحو التالى :

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}\,\frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad , \quad \dot{Q}_2 = \dot{Q}\,\frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad \dots\dots\dots \text{(٨ — ٢٥)}$$

حيث :

$$\dot{Q}_1 = \dot{I}_1 V_l = I_1 V_l \,\underline{|\phi_1} = Q_1 \,\underline{|\phi_1}$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{I}_2 V_l = I_2 V_l \,\underline{|\phi_2} = Q_2 \,\underline{|\phi_2}$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = \dot{I}\, V_l = I\, V_l \,\underline{|\phi} = Q \,\underline{|\phi} \quad \dots\dots \text{(٨ — ٢٦)}$$

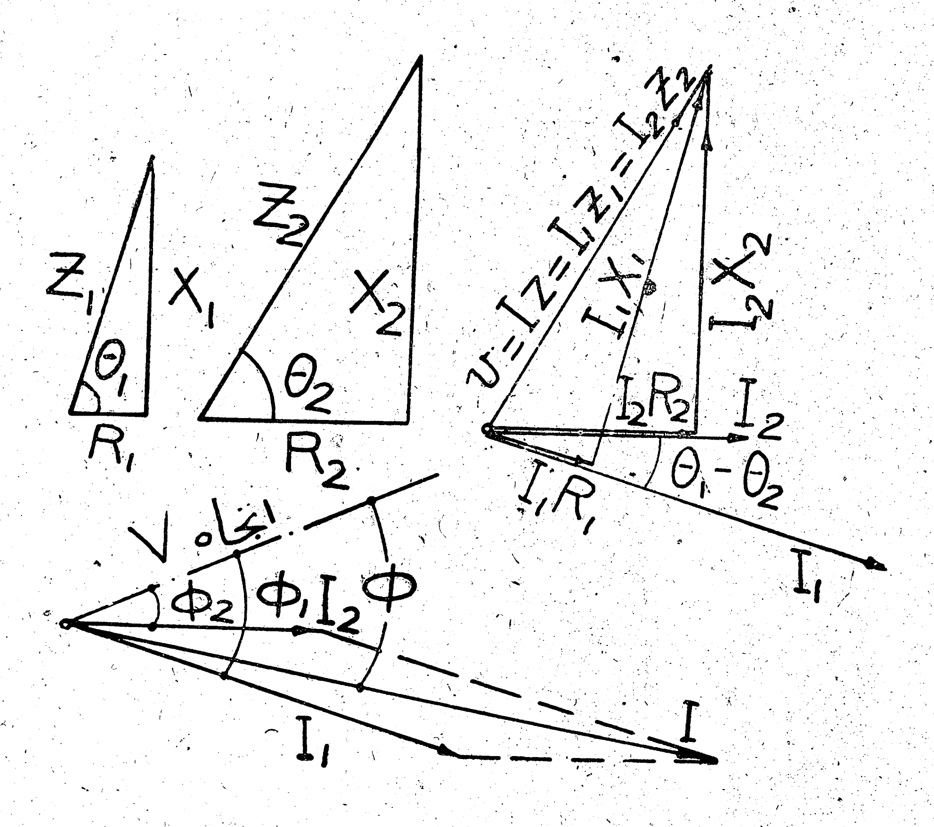
وبالنسبة للحمل الكلى بالكيلو وات KW ، وتوزيعه إلى الحملين KW_2, KW_1 على المحولين، نجد أن :

$$KW = Q \cos\phi = I V_l \cos\phi$$

$$KW_1 = Q_1 \cos\phi_1 = I_1 V_l \cos\phi_1$$

$$KW_2 = Q_2 \cos\phi_2 = I_2 V_l \cos\phi_2 \quad \dots\dots \text{(٨ — ٢٧)}$$

هذا ويجب ألا ننسى ، فى خلال ذلك كله ، أن استخدامنا V_l بالقيمة فقط ، يعنى أننا اعتبرناها منطبقة على المحور المرجعى ، أو اتخذناها هى نفسها محورا مرجعيا ، كما سبق فعله فى حالات كثيرة .



شكل (١٧ — ٨)

يمكن الحصول على توزيع التيار (أو الكيلو فولت أمبير) باستخدام الرسم باتباع الطريقة المبينة فى شكل (١٧ — ٨) . وتعتمد هذه الطريقة أساسا على أن متجهى هبوط الضغط فى المحولين يكونان منطبقين تماما ، على الرغم من اختلاف قيمتى المقاومة ومانعة التسرب فى المحولين ، وكذلك اختلاف قيمـــة الزاوية

$\theta_1 = \tan^{-1}\frac{X_1}{R_1}$ للمحول الأول، عن الزاوية $\theta_2 = \tan^{-1}\frac{X_2}{R_2}$ فى المحول الثانى . نبدأ برسم مثلثى المعاوقة للمحولين، بحيث تنطبق المقاومتان على المحور المرجعى ، وبمقياس رسم منـــاسب . بذلك تصبح الزاوية بين متجهى المعاوقة $\dot{Z}_1$, $\dot{Z}_2$ عبارة عن $\theta_1 - \theta_2$ (بفرض أن $\theta_1 > \theta_2$) . فاذا راعينا أن القيمة العددية $I_1\ Z_1$ تساوى القيمة العددية $I_2\ Z_2$ ، نجد أن $\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{I_1}{I_2}$.

وهذا يعنى أن النسبة بين قيمتى التيـار فى المحولين تسـاوى مقلوب النسبة بين معاوقتيهما ، مما يجعلنا نستطيع تحديد قيمة كل من التيارين ، عـلى أسـاس هذه النسبة ، وذلك بمقياس رسم معين ، غير معروف بعد . ويكون ذلك بأن نحدد طول I_2 مساويا Z_1 ، وطول I_1 مساويا Z_2 ، على أساس أن الزاوية بين اتجاهى هذين التيارين هى $\theta_1 - \theta_2$ ، وبحيث يكون I_2 فى إتجاه Z_2 , I_1 فى إتجاه Z_1 ، كما هو مبين فى شكل (١٧ — ٨) . بجمع متجهى التيارين I_1 , I_2 * نحصـل عـلى متجه تيار الحمل الكلى I بنفس مقياس الرسم لهذين التيارين ، الذى لم يتحدد بعد. ونظرا لأن قيمة I معروفة ، فاننا نستطيع تحديد مقياس الرسم لهـذه التيـارات جميعا ، حيث يكون :

$$\text{كل اسم يمثل} \quad \frac{I\ \text{أمبير}}{\text{طـول } I \text{ بالسنتيمترات}} \quad \text{أمبير}$$

وتتحدد زاويتا الاختلاف المرحلى للتيارين ، مـع الضغط المرحـــلى V ، برسم متجه هذا الضغط ، بحيث يصنع مع التيـار I زاوية الاختـلاف المرحـلى المعروفة ϕ ، كما هو مبين فى شكل (١٧ - ٨) .

---

* يمكن استخدام $\dot{Q}_1$, $\dot{Q}_2$ بدلا من $\dot{I}_1$ و $\dot{I}_2$ كما سبق شرحه بالنسبة للحل التحليلى .

يكون استخدام الوسائل السابقة لتحديد كل من I_1 و I_2 ، وزاوية الاختلاف المرحلى لكل منهما ، على أساس معرفة R_1,R_2 وكذلك X_2,X_1 . ولكن توجد حالات يكون معلوما فيها هبوط الضغط النسبى ε_r ، فى المقاومة ، لكل من المحولين ، وكذلك هبوط الضغط النسبى ε_x ، فى ممانعة التسرب ، لكل من المحولين ، حيث :

$$\varepsilon_{r1} = \frac{I_1 R_1}{V} \quad , \quad \varepsilon_{r2} = \frac{I_2 R_2}{V}$$

$$\varepsilon_{x1} = \frac{I_1 X_1}{V} \quad , \quad \varepsilon_{x2} = \frac{I_2 X_2}{V} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \text{(٨—٢٨)}$$

ويكون الحل المباشر ، فى هذه الحالة ، أن نحصل أولا على كل من R_1,R_2 ، وكذلك X_1,X_2 من المعلومات المتوفرة لدينا ، ثم نتابع الحل على نفس الوتيرة السابقة . ولكننا نستطيع اختصار الخطوة الأولى ، واستخدام الضغوط النسبية بدلا من المقاومات ، وممانعات التسرب المناظرة . دون أن يتأثر الحل ، إذا كان $I_1 = I_2$ ، أو إذا كان $Q_1 = Q_2$ ، بمعنى أصح فاذا لم يتوفر هذا الشرط ، وجب علينا الحصول على ضغوط نسبية مكافئة ε_{r2} و ε_{r1} و ε_{x2} و ε_{x1} ، منسوبة إلى تيار موحد I_b ، وذلك على أساس القيم الفعلية لكل من R_2,R_1 وكذلك X_2,X_1 ، كما نحصل عليها من المعادلة (٢٨—٨) ، بدلالة الضغوط النسبية المعطاة . ونحصل على التيار الموحد I_b بفرض قدرة ظاهرية أساسية Φ_b (base KVA) ، تتحدد قيمتها كما نشاء وبناء على هذا كله نجد أن :

$$Q_b = V\, I_b \times 10^{-3} \quad , \quad I_b = \frac{Q_b \times 10^3}{V}$$

$$R_1 = \frac{V\,\varepsilon_{r1}}{I_1} \quad , \quad \varepsilon'_{r1} = \frac{I_b\,V\,\varepsilon_{r1}}{I_1 V} = \varepsilon_{r1}\,\frac{Q_b}{Q_1}$$

$$R_2 = \frac{V\,\varepsilon_{r2}}{I_2} \quad , \quad \varepsilon'_{r2} = \frac{I_b\,V\,\varepsilon_{r2}}{I_2 V} = \varepsilon_{r2}\,\frac{Q_b}{Q_2}$$

$$X_1 = \frac{V\,\varepsilon_{x1}}{I_1} \quad , \quad \varepsilon'_{x1} = \frac{I_b\,V\,\varepsilon_{x1}}{I_1 V} = \varepsilon_{x1}\,\frac{Q_b}{Q_1}$$

$$X_2 = \frac{V\,\varepsilon_{x2}}{I_2} \quad , \quad \varepsilon'_{x2} = \frac{I_b\,V\,\varepsilon_{x2}}{I_2 V} = \varepsilon_{x2}\,\frac{Q_b}{Q_2} \qquad (\text{٢٩—٨})$$

وهذا يعنى أن كل ما هو مطلوب منا عمله ، للحصول على الضغوط النسبية ، التى يمكن استخدامها فى الحل بدلا من المقاومات والمعاوقات ، أن نضرب كلا من الضغوط النسبية المعطاة فى نسبة القدرة الظاهرية الأساسية ، التى نختارها كما نشاء* ، إلى القدرة الظاهرية المحسوب على أساسها الضغط النسبى المناظر .

٢ — توزيع التيار (أو الحمل) عند اختلاف نسبة التحويل :

يختلف الضغط على طرفى كل من الملفين الثانويين للمحولين ، فى حالة اللاحمل قبل توصيلهما على التوازى معا ، باعتبار أن الملفين الابتدائيين موصلان إلى الينبوع الذى ضغطه V . نفترض ، فى هذه الحالة ، أن نسبة التحويل فى المحول الأول α_1 ، وفى المحول الثانى α_2 (باعتبار محولين اثنين موصلين على التوازى) ، وأن الضغط على طرفى الملف الثانوى للمحول الأول ، فى حالة عدم وجود الحمل ، وقبل توصيل الملفين الثانويين على التوازى ، هو V_1 ، وأن الضغط المناظر على

---

* نختار عادة القدرة الظاهرية لأحد المحولين كأساس ، فلا نحسب له ضغوط نسبية ظاهرية جديدة ، ونوفر بذلك بعض العمليات الحسابية .

طرفى الملف الثانوى للمحول الثانى هو V_2 . يمكن ، للحصول على توزيع التيار (أو الحمل بالكيلوفولت أمبير) ، اجراء الحل بطريقتين ، على النحو التالى :

اولا : عند توصيل الملفين الثانويين على التوازى ووضع الحمل عليهما (أى بعد قفل المفتاح S شكل (١٤ — ٨)) يصبح الضغط على كل من طرفى الملفين الثانويين واحدا وهو V_l ، ولكن يختلف الضغط المحول بوساطة المحول المثالى فيصبح $\frac{V}{\alpha_1}$ بالنسبة للمحول الأول و $\frac{V}{\alpha_2}$ بالنسبة للمحول الثانى . لذلك نجد أن هبوط الضغط $\dot{I}_1 \dot{Z}_1$ فى المحول الاول يساوى $\frac{\dot{V}}{\alpha_1} - \dot{V}_l$ ، وهبوط الضغط فى المحول الثانى $\dot{I}_2 \dot{Z}_2$ يساوى $\frac{\dot{V}}{\alpha_2} - \dot{V}_l$ ، عند مرور التيار الحمل $\dot{I}$ الذى يساوى $\dot{I}_1 + \dot{I}_2$ فى هذه الحالة . وبتعميم الحل لعدة محولات تعمل على التوازى معا ، بحيث تمتلك نسب تحويل مختلفة α_1 ، α_2 ، α_3 ، ... الخ ، واتخاذ ضغط الينبوع V كمحور مرجعى ، يمكن الحصول على توزيع تيار الحمل $\dot{I}$ على المحولات المختلفة من المعادلات الآتية :

$$\frac{V}{\alpha_1} - \dot{V}_l = \dot{I}_1 Z_1 = \frac{\dot{I}_1}{\dot{Y}_1} \left(\dot{Y}_1 = \frac{1}{Z_1} \right)$$

$$\frac{V}{\alpha_2} - \dot{V}_l = \dot{I}_2 \dot{Z}_2 = \frac{\dot{I}_2}{\dot{Y}_2} \left(\dot{Y}_2 = \frac{1}{Z_2} \right)$$

$$\frac{V}{\alpha_3} - \dot{V}_l = \dot{I}_3 \dot{Z}_3 = \frac{\dot{I}_3}{\dot{Y}_3} \left(\dot{Y}_3 = \frac{1}{Z_3} \right) \quad \ldots\ldots (٨ — ٢٠)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \cdots = \dot{Y}_1 \left(\frac{V}{\alpha_1} - \dot{V}_l \right)$$

$$+ \dot{Y}_2 \left(\frac{V}{\alpha_2} - \dot{V}_l \right) + \dot{Y}_3 \left(\frac{V}{\alpha_3} - \dot{V}_l \right)$$

$$= V \left(\frac{\dot{Y}_1}{\alpha_1} + \frac{\dot{Y}_2}{\alpha_2} + \frac{\dot{Y}_3}{\alpha_3} + \cdots \right)$$

$$- \dot{V}_l \left(\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3 + \cdots \right) \cdots \cdots \text{(٨ - ٣١)}$$

بوضع

$$\alpha'_1 = \frac{1}{\alpha_1} \quad , \quad \alpha'_2 = \frac{1}{\alpha_2} \quad , \quad \alpha'_3 = \frac{1}{\alpha_3}$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}_l}{\dot{Z}_l} = \dot{V}_l \dot{Y}_l \quad \left(\dot{Y}_l = \frac{1}{\dot{Z}_l} \right)$$

$$\therefore \quad \dot{V}_l = \dot{V} \frac{(\alpha'_1 \dot{Y}_1 + \alpha'_2 \dot{Y}_2 + \alpha'_3 \dot{Y}_3 + \ldots)}{(\dot{Y}_l + \dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3 + \cdots)} \quad \text{(٨ — ٣٢)}$$

بذلك نستطيع ، باستخدام المعادلة (٣٢ — ٨) ، أن نحصل على $\dot{V}_l$ أولا ،

ثم نحصل ، بالتعويض بها فى المعادلات (٣٠ — ٨) ، على التيارات $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3 \cdots$

حيث :

$$\dot{I}_1 = \dot{Y}_1 (\alpha'_1 V - \dot{V}_l)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{Y}_2 (\alpha'_2 V - \dot{V}_l)$$

$$\dot{I}_3 = \dot{Y}_3 (\alpha'_3 V - \dot{V}_l) \cdots\cdots\cdots\cdots \text{(٨ — ٣٣)}$$

ثانيا : يكون الضغط على طرفى الملف الثانوى فى المحول المثالى الأول هو $V_1 = \frac{V}{\alpha_1}$ ، والضغط على طرفى الملف الثانوى فى المحول المثالى الثانى $V_2 = \frac{V}{\alpha_2}$ (تستخدم هذه الطريقة فى حالة محولين يعملان على التوازى فقط).

ومالم يكن هناك سبب معين يدعو إلى وجود اختلاف مرحلى بين V_2, V_1 ، فاننا نعتبرهما عادة فى اتفاق مرحلى معا ، ومع ضغط الينبوع V فى نفس الوقت .

ونستطيع ، فى هذه الحالة ، الحصول على التيارين $\dot{I}_2 , \dot{I}_1$ بالإستفادة من العلاقات الآتية :

$$\dot{v} = \dot{I}\ \dot{Z}_{12} = (\dot{I}_1 + \dot{I}_2)\ \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{Z_1 + \dot{Z}_2}$$

$$\alpha'_1 V = V_1 = \dot{I}_1 \dot{Z}_1 + (\dot{I}_1 + \dot{I}_2)\ \dot{Z}_l$$

$$\alpha'_2 V = V_2 = \dot{I}_2 \dot{Z}_2 + (\dot{I}_1 + \dot{I}_2)\ \dot{Z}_l \quad \text{......... (٨ – ٣٤)}$$

$$\therefore \quad V_1 - V_2 = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_2 \dot{Z}_2 \quad \text{................. (٨ – ٢٥)}$$

$$\therefore \quad \dot{I}_1 = \frac{(V_1 - V_2) + \dot{I}_2 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1} \quad \text{.............. (٨ – ٣٦)}$$

بالتعويض من المعادلة (٣٦ – ٨) فى المعادلة (٣٤ – ٨) ، نجد أن :

$$V_2 = \dot{I}_2 \dot{Z}_2 + \left[\frac{(V_1 - V_2) + \dot{I}_2 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1} + I_2 \right] \dot{Z}_l$$

$$\therefore \quad \dot{I}_2 = \frac{V_2 \dot{Z}_1 - (V_1 - V_2)\dot{Z}_l}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \dot{Z}_l(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2)} \quad \dots\dots\dots \ (\text{٨ — ٣٧})$$

وبالمثل يمكن حل المعادلات بالنسبة لـ $\dot{I}_1$ ، فنحصل على :

$$\dot{I}_1 = \frac{V_1 \dot{Z}_2 + (V_1 - V_2)\dot{Z}_l}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \dot{Z}_l(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2)} \quad \dots\dots\dots \ (\text{٨ — ٣٨})$$

عندما يكون هناك اختلاف مرحلى بين الضغطين V_2, V_1 ، كما يحدث عند توصيل محولين ثلاثى المراحل ، أحدهما نجمة/نجمة والآخر نجمة/دلتا مثلا ، على التوازى ، يجب مراعاة أن كلا من V_2, V_1 أصبح كمية موجهة ، فيستخدم المتجهان $\dot{V}_2, \dot{V}_1$ فى المعادلات السابقة ، بدلا من الرقمين V_2, V_1 ، المنطبقين على المحور المرجعى .

عندما يكون المحولان موصلين على التوازى معا بدون وجود الحمل ، أى عند توصيل المفتاح S فى شكل (١٤ — ٨) ، واعتبار أن Z_l تساوى مالانهاية ، يمر تيار قصر بين المحولين ، فى نفس إتجاه تيار الحمل فى أحدهما ، وفى عكس إتجاه تيار الحمل فى الآخر . ونحصل على قيمة هذا التيار ، بالنسبة لكل من المحولين ، بوضع قيمة Z_l بمالانهاية فى المعادلتين (٣٧ — ٨) ، (٣٨ — ٨) ، فنجد أن :

$$\dot{I}_{2o} = \frac{(V_2 - V_1)}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad , \quad \dot{I}_{1o} = \frac{(V_1 - V_2)}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad \dots \ (\text{٨ — ٣٩})$$

$$\therefore \quad \dot{I}_{2o} = -\dot{I}_{1o}$$

ويتضح من هذا كله أن اختلاف نسبة التحويل فى المحولين يؤدى إلى زيادة

نصيب أحدهما من الحمل ، ونقصانه للآخر ، بحيث تكون الزيادة فى المحول الذى يمتلك نسبة التحويل الأكبر .

مثال (١) :

A 400 KVA, single phase transformer with reactance drop of 5 % and resistance drop of 1 %, is connected in parallel on both the high voltage and low voltage sides with another 300 KVA, single phase transformer having the same turns ratio, with reactance drop of 6 % and resistance drop of 2.25 %. If the secondary voltage of each transformer is 500 V, find how they will share a load of 600 KVA at 0.8 power factor lagging.

نظرا لإختلاف مقنن القدرة فى المحولين ، واعطاء هبوط الضغط النسبى فى المقاومتين ومانعتى التسرب ، يجب حساب هبوط الضغط النسبى باعتبار كيلو فولت أمبير أساسى ، نختاره يساوى مقنن قدرة أحد المحولين ، وليكن $KVA_b = 400$ ، كما سبقت الاشارة اليه . بذلك يظل الضغط النسبى كما هو فى المحول الأول ، بينما نحصل على الضغط النسبى ، اللازم لإجراء الحساب ، فى المحول الثانى ، بضرب الضغط النسبى المعطى فى النسبة $\frac{KVA_b}{KVA_2} = \frac{400}{300}$. وعلى هذا الأساس نجد أن :

$$\dot{Z}_1 = (1 + j\,5) = 5.1\ \underline{|78.7^\circ}\ \Omega$$

$$\dot{Z}_2 = (2.25 + j\,6) \times \frac{400}{300} = (3 + j\,8) = 8.55\ \underline{|69.4^\circ}\ \Omega$$

$$\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 = (4 + j\,13) = 13.6\ \underline{|72.9^\circ}\ \Omega$$

$$\dot{Q} = 600 \underline{|-36.9^\circ} = 480 - j\,360$$

$$\dot{Q}_1 = 600 \underline{|-36.9^\circ} \times \frac{8.55 \underline{|69.4^\circ}}{13.6 \underline{|72.9^\circ}} = 377 \underline{|-40.4^\circ}$$

$$\cos\phi_1 = 0.7615 \text{ lag.}, \quad KW_1 = 287.5, \quad I_1 = 754 \underline{|-40.4^\circ}\ A$$

$$\dot{Q}_2 = 600 \underline{|-36.9^\circ} \times \frac{5.1 \underline{|78.7^\circ}}{13.6 \underline{|72.9^\circ}} = 224.5 \underline{|-31.1^\circ}$$

$$\cos\phi_2 = 0.8563 \text{ lag.}, \quad KW_2 = 192.5, \quad I_2 = 449 \underline{|-31.1^\circ}\ A$$

$$KW_1 + KW_2 = 480 = Q\cos\phi = 600 \times 0.8$$

يمكن حل المسألة بالرسم باتباع الطريقة المبينة فى شكل (١٧ — ٨).

مثال (٢) :

A 500 KVA, 3000/510 V, single phase transformer with reactance drop of 4 % and resistanee drop of 1 % is connected on the high voltage side to a 3000 V supply in parallel with a 250 KVA, 3000/500 V, single phase transformer having reactance drop of 6% and resistance drop of 1.5 %. With the secondary windings connected in parallel, calculate : (a) the cross currents in the secondaries on no load, (b) the secondary current in each transformer when the total load is 650 KVA at 0.8 power factor lagging, (c) the terminal voltage at this load.

يمكن حل هذه المسألة ، بمنتهى الدقة ، إذا كان المعلوم هو معاوقة الحمل $\dot{Z}_l$ ، بدلا من الحمل نفسه ، كما هو معطى فى رأس المسألة . وفى هذه الحالة (عند

إعطاء $\dot{Z}_l$) يمكن ، بالتعويض فى المعادلتين (٣٧ — ٨) ، (٣٨ — ٨) ، على أساس أن $V_1 = 510$ و $V_2 = 500$ ، حساب كل من $\dot{I}_2$, $\dot{I}_1$ ، ثم حساب الضغط للطرفى على الحمل $\dot{V}_l$ ، حيث أن :

$$\dot{V}_l = (\dot{I}_1 + \dot{I}_2)\,\dot{Z}_l = \dot{I}\,\dot{Z}_l$$

ومن ناحية أخرى يمكن ، بالتعويض فى المعادلة (٣٢ — ٨) ، على أساس أن $\alpha'_1 = \frac{510}{3000}$ ، $\alpha'_2 = \frac{500}{3000}$ ، الحصول على $\dot{V}_l$ مباشرة ، ثم حساب كل من $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$ باستخدام المعادلات (٣٣ — ٨)) وذلك كله باعتبار أن $V = 3000$

لذلك يجب ، لكى نتمكن من حل المسألة بوضعها الراهن ، أن نحصل أولا على $\dot{Z}_l$ باستخدام المعلومات المعطاة . وفى هذه الحالة لابد من فرض قيمة تقريبية مبدئية للضغط على طرفى الحمل ، ولتكن 500 فولت . سوف نحصل ، بناء على ذلك ، على نتائج تقريبية ، يمكن استخدامها بعد ذلك للحصول على نتائج أكثر دقة ، وهكذا بطريقة التتابع ، حتى نحصل على النتائج بالدقة المطلوبة.
وسوف نكتفى بالنتائج التقريبية الأولى فى هذا الحل . نبدأ بحساب X_2 , R_2 , X_1 , R_1 ثم Z_2 , Z_1 من القيم المئوية المعطاة ، على أساس مقنن التيار فى كل محول I_2 , I_1 ، حيث :

$$I_1 = \frac{500 \times 1000}{500} = 1000 \quad A \quad ,$$

$$I_2 = \frac{250 \times 1000}{500} = 500 \quad A$$

$$R_1 = \frac{1 \times 500}{1000 \times 100} = 5 \times 10^{-3}\ \Omega \quad ,$$

$$X_1 = \frac{4 \times 500}{1000 \times 100} = 2 \times 10^{-2}\ \Omega$$

$$\dot{Z}_1 = 0.005 + j\,0.02 = 0.0206\,\underline{|76^\circ}\ \Omega$$

$$R_2 = \frac{1.5 \times 500}{500 \times 100} = 0.015\ \Omega \quad ,$$

$$X_2 = \frac{6 \times 500}{500 \times 100} = 0.06\ \Omega$$

$$\dot{Z}_2 = 0.015 + j\,0.06 = 0.062\,\underline{|76^\circ}\ \Omega$$

$$\dot{I}_l = \frac{650 \times 1000}{500}\,\underline{|-\cos^{-1} 0.8} = 1300\,\underline{|-37^\circ}\ A$$

$$\dot{Z}_l = \frac{\dot{V}_l}{\dot{I}_l} = \frac{500}{1300\,\underline{|-37^\circ}} = 0.384\,\underline{|37^\circ}\ \Omega$$

$$= 0.307 + j\,0.23\ \Omega$$

للحصول على المطلوب فى (د) نعوض فى المعادلتين (٣٩ — ٨) ، حيث :

$$I_{10} = \frac{510 - 500}{0.005 + j\,0.02 + 0.015 + j\,0.06} = \frac{1000}{8.25\,\underline{|76^\circ}}$$

$$= 121\,\underline{|-76^\circ}$$

$$\dot{I}_{20} = -\dot{I}_{10} = 121\,\underline{|104^\circ}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{510\,(0.015 + j\,0.06) + 10\,(0.307 + j\,0.23)}{0.0206\,\underline{|76^\circ} \times 0.062\,\underline{|76^\circ} + 0.384\,\underline{|37} \times 0.0825\,\underline{|76^\circ}}$$

$$= \frac{10.72 + j\,32.9}{(-137.3 + j\,296) \times 10^{-4}} = \frac{34.7 \,\underline{|72^\circ}}{329 \times 10^{-4} \,\underline{|115^\circ}}$$

$$= 1050 \,\underline{|-34^\circ}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{500 \times 0{\cdot}0206 \,\underline{|76^\circ} - 10 \times 0.384 \,\underline{|37^\circ}}{329 \times 10^{-4} \,\underline{|115^\circ}}$$

$$= \frac{-0.53 + j\,7.7}{329 \times 10^{-4} \,\underline{|115^\circ}}$$

$$= \frac{7.75 \,\underline{|86^\circ}}{329 \times 10^{-4} \,\underline{|115^\circ}} = 235 \,\underline{|-29^\circ}$$

$$\dot{V}_l = \dot{V}_1 - \dot{I}_1 \dot{Z}_1 = 510 - 1050 \,\underline{|-43^\circ} \times 0.0206 \,\underline{|76^\circ}$$

$$= 510 - 21.65 \,\underline{|33^\circ}$$

$$= 510 - 18.2 - j\,12 = 491.8 - j\,12$$

يمكن أن نحسب $\dot{V}_l$ من ناحية المحول الثانى ، ولايجب أن نتوقع الحصول على نفس النتيجة بالضبط ، بسبب التقريب المفروض .

$$\dot{V}_l = \dot{V}_2 - \dot{I}_2 \dot{Z}_2 = 500 - 235 \,\underline{|-29^\circ} \times 0.062 \,\underline{|76^\circ}$$

$$= 500 - 14.57 \,(0.682 + j\,0.7314)$$

$$= 490.1 - j\,10.8$$

ملحوظة :

إذا كانت $V_1 = V_2$ ، أى عند تساوى نسبة التحويل فى المحولين ، فانه يمكن حل المسألة بدقة، إذا كان الحمل الكلى معطى ، وذلك بالحصول على قيمة $\dot{V}_l$

أولا على النحو التالى :

توجد أولا المعاوقة الكلية المكافئة لمعاوقتى المحولين ، عند توصيلهما على التوازى معا ، حيث :

$$\dot{Z}_{12} = \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} = R_{12} + jX_{12}$$

نعتبر وجود محول واحد بهذه المعاوقة المكافئة ، يكون الضغط على طرفى ملفه الثانوى فى الحالة المثالية هو V' ، وهو يناظر القوة الدافعة الكهربية المرحلية E_o ، بالنسبة للمولد . نستطيع فى هذه الحالة استخدام المعادلة (٧ — ٤) ، الخاصة بالمولدات ، صفحة ١٨١ ، للحصول على V_l ، باعتبارها مناظرة للضغط المرحلى على أطراف المولد V ، وباعتبار R_{12} تناظر R_a ، كما أن X_{12} تناظر X_s ويكون P , Q هما مركبتا الحل المعطى ، بضرب الـ KVA فى $\sin\varphi$, $\cos\varphi$.

أما إذا لم تكن $V_1 = V_2$ ، فاننا نستطيع حل المسألة ، بنفس الطريقة ، على أساس أن $V_1 = V_2$ ، وكلا منهما تساوى الضغط الأصغر ، ثم نقوم بعملية تجميع لكل تيار ، مع نظيره من التيارين I_{20} ، I_{10} ، على نفس النمط ، كما فعلنا فى حالة المولدات ، بالاشارة إلى شكل (٦ — ٤ د) ، صفحة ١٩٠ .

مسائل على الباب الثامن

1 — Three 1 — phase transformers connected in mesh supply 100 A per line to a 3 — phase, 3 — wire system. (a) what is the current in each transformer? one unit develops a fault and is removed : (b) by how much is the capacity of the set reduced for the same temperature — rise ? (c) find the current in

each of the remaining transformers if the line current corresponds to the rating in (b).

2 — A 3 - phase, step - down transformer is connected to 6600 V mains, and takes 10 A. Calculate the secondary line voltage, line current and output for the following connections ; (a) mesh/mesh, (b) star/star, (c) mesh/star, (d) star/mesh. The ratio of turns per phase is 12. Neglect losses.

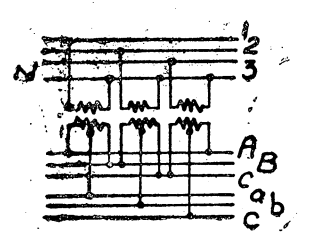
3 — A ligting load of I amperes is taken from one phase of a 3 - phase tramsformer bank. Find the current distribution in the phases and in the lines (a) when the transformers are connected mesh/mesh, (b) When the primary side is connected in star (3 - wire) and the secondary in mesh, and (c) When both sides are connected in V or open -delta.

4 — Derive an expression for the approximate relative weights of copper in an auto - transformer and a 2 - winding transformer, the primary voltage being V_1 and the secondary voltage V_2. Compare the weights of copper wqen the transformation ratio is 3. Ignore the magnetising current.

5 — Find the values of the currents flowing in the various branches of a 3 - phase, star - connected auto - transformer loaded with 500 KW at power factor 0.8 lagging, and having a ratio of 440/500 V. Neglect voltage drops and all losses in the transformer, also the magnetising current.

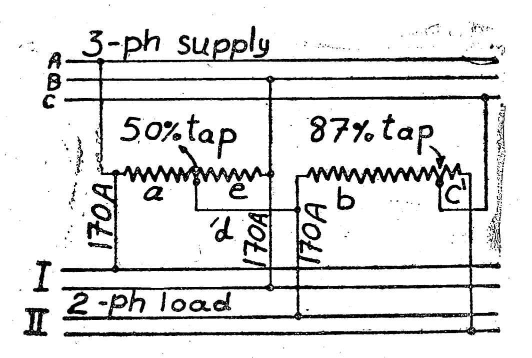
6 — Mid - points of the secondaries of a bank of 4000/

440 V transformers are used to provide a lower voltage, as shown in the diagram. Find (a) the voltage



of the bus - bars abc and (b) the currents in the transformer secondaries when currents of 100 A at unity power factor are taken from each of the two sets of low voltage bus - bars abc and ABC.

7 — Two 1 - phase auto - transformers are scott - connected and loaded as shown in the diagram. Determine the



currents in the parts a,b,c,d,e and the 3 - phase load current - Draw a schematic diagram showing the current directions in all circuits.

8 — Two 100 — KVA, 1 — phase transformers are connected in parallel on both primary and secondary

sides . One transformer has an ohmic drop of 0.5 % and a reactive drop of 8 % of the voltage on full load. The other has corresponding drops of 0.75 % and 4 % respectively. How will the following total loads be shared ? (a) 180 KW at 0.9 lagging power factor, (b) 120 KW at 0.6 lagging power factor, (c) 200 KW at unity power factor.

9 — The short - circuit tests of two, 1 - phase, 3300/220 V transformers are as follows :

A — primary voltage, 100 V, secondary current, 2[illegible]0 A, power, 600 W.

B — primary voltage, 80 V , secondary current 230 A , power, 1100 W.

The transformers are run in parallel on the same primary and secondary bus - bars, and carry a total load (input) of 100 KW at 0.8 power factor (lagging) Find the approximate primary load currents, power factors, and power distribution between the two transformers.

10 — Two 1 - phase transformers, A and B are connected in parallel to supply a load having a resistance of 5 Ω and an inductive reactance of 2 Ω. The equivalent resistances refferd to the secondary windings are 0.25 Ω and 0·3 Ω and the equivalent reactances are 1.5 Ω and 2 Ω respectively. The open - circuit secondary veltages are in the ratio 100 : 98 . Calculate the inductive reactance which, when connected in series with the secondary of transformer B, will cause the

magnitudes of the currents delivered by A and B to be in the ratio of 1.8 : 1

11 — The ratio of the numbers of turns per phase in the primary, secondary, and tertiary windings of a transformer is 10 : 2 : 1 with lagging currents of 45 A at power factor 0.8 in the secondary, and 50 A at power foctor 0.71 in the tertiary winding, find the primary current and power factor,

12 — Explain why a star-delta transformer, and a star-star transformer, having the same transformation ratio between primary line voltage and secondary line voltage may not be operated in parallel.

(b) sketch a ciruit diagram for three-to-two phase conversion by the scott system, and explain the princples involved If the two - phase output is balanced at 50 KVA per phase at 300 volts, and the three - phase input is at 6.6 KV, determine the current and voltage relevant to each winding of each transformer. Ignore all transformer imperfections and sketch the vector diagram.

13 — An 82 KVA, 6600/400 V, 50 c/s, single phase transformer has a power input of 1000 W when tested on no load at rated voltage. When the low voltage side is short circuited and 100 V applied to the primary side, it takes a current of 5.5 amps and a power of 300 W. Calculate the efficiency and percentage regulation at full load, 0.8 power factor lagging.

If the above transformer is connected in parallel with a 110 KVA, 6600/400 V transformer which has a percentage

reactance of 3.6 and a percentage resistance of 1.1, find how they share a load of 140 KVA at 0.8 power factor lagging.

14 — Two single phase transformers supply, in parallel, a secondary load of 1000 A at 0.8 power factor lagging. For each transformer the secondary E.M.F on open circuit is 3300 V, and the total leakage impedances, in terms of the secondary, are 0.1 + j 0.2 and 0.05 + j 0.4 ohm respectively. Determine the output current for each transformer, and the ratio of the KW output of the two transformers.

15 — Describe and prove how two transformers, having impedances of Z_1 and Z_2, share a total load of I amps, the two transformers having equal voltage ratios.

Two 100 K.V.A., 1—phase transformers are connecred in parallel on both primary and secondary sides. One transformer has an ohmic drop of 0.5 % and a reactive drop of 8 % of the voltage on full load. The other has corresponding drops of 0.75 % and 4 % respectively. How will they share a total load of 180 K.W. at 0.9 power factor lagging and what will be the power factor of the current in each transformer?

16 — Two transformers are connected with primaries in parallel to a 1000 V supply and with their secondaries in parallel to a one ohm impedance having an inductive reactance of 0.6 ohm.

Calculate the primary current of each transformer in magnitude

and phase if one transformer has a turns ratio of 10, a leakage reactance referred to the secondary of 0.6 ohm and a resistance referred to the secondary of 0.2 ohm. The corresponding values for the other transformer are 9.8, 0.07 and 0.03 respectively. The magnetising currents may be neglected.

الباب التاسع

بعض المشاكل الهامة فى المحولات واختباراتها

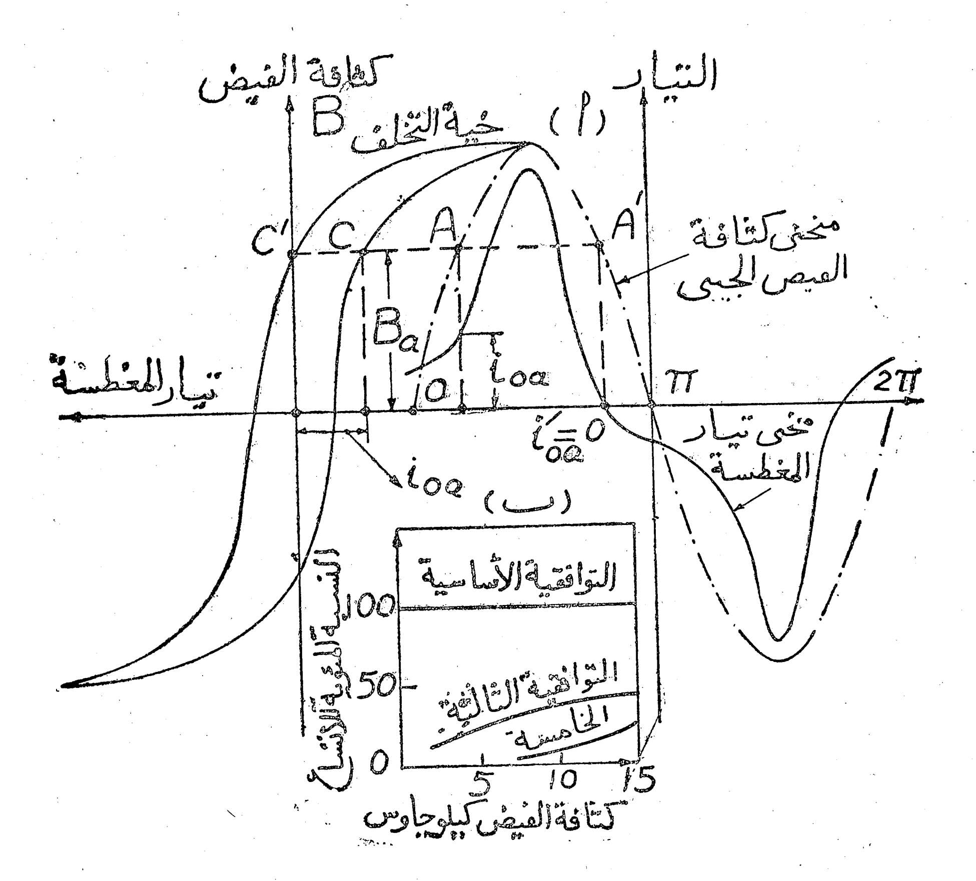
(Some special problems and testing of transformers)

نبدأ فى هذا الباب بدراسة أهم المشاكل الخاصة فى المحولات ، وهى التى تؤثر عادة على ملامح التصميم ، وذلك حتى نكون على بينة من أمرها عند دراسة طرق التصميم .

اولا — التوافقيات فى المحولات (Harmonics in transformers) :

سبق الفرض فى دراستنا للمحولات أن ضغط الينبوع ، الموصل إلى الملف الابتدائى ، يكون متغيرا على منحنى جيبى ، بحيث ينتج فيض مغناطيسى ، فى القلب الحديدى ، يتغير هو الآخر ، تبعا لذلك ، على منحنى جيبى أيضا . وقد حان الوقت لأن نسأل أنفسنا ، كيف يكون شكل منحنى تيار المغطسة ، فى هذه الحالة ، باعتبار أن التشبع المغناطيسى واقع ، بالنسبة لخطوط القوى المغناطيسية فى القلب الحديدى ، لا محالة .

يمكن رسم منحنى تيار المغطسة باستخدام منحنى التمغطس ، بدورته الكاملة مع أخذ التخلف المغناطيسى فى الاعتبار ، ومنحنى كثافة الفيض المغناطيسى فى القلب الحديدى ، الذى يتغير على شكل جيبى ، كما هو مبين فى شكل (١ — ٩أ) .
للحصول على قيمة تيار المغطسة i_{oa} ، عند نقطة على منحنى التيار مثل a مثلا ، نحدد قيمة كثافة الفيض المغناطيسى B_a (النقطة A على المنحنى الجيبى الخاص بكثافة الفيض) ، ومنها يمكن تحديد النقطة c على منحنى التمغطس ، ثم قيمة



شكل (١ — ٩)

تيار المغطسة i_{oa} ، كما هو مبين باتجاهات الأسهم فى الشكل . ويلاحظ أن هناك قيمتين للتيار i_{oa} و i'_{oa} مع نفس قيمة كثافة الفيض B_a ، وهما مختلفتان بسبب التخلف المغناطيسى . وينشأ عن الانحناء ، الناتج من ظاهرة التشبع،فى منحنى المغطسة ، أن يختلف مجرى منحنى تيار المغطسة عن الشكل الجيبى ، كما أن قيمة النهاية العظمى له ترتفع بصورة حادة ، كلما زاد دخولنا فى منطقة التشبع . وبعمل تحليل فورير لمثل هذا التيار، نجد أنه يحتوى ، علاوة على التوافقية الأساسية ، على توافقية ثالثة بارزة ، كما أنه قد يحتوى على توافقية خامسة أيضا . وتزداد

قيمة اتساع كل من هذه التوافقيات بالنسبة للتوافقية الأساسية ، كلما ازدادت قيمة كثافة الخطوط المغناطيسية فى القلب الحديدى ، أى كلما ازداد الدخول فى منطقة التشبع ، كما هو مبين فى شكل (١ — ٩ب) ، وكما يتضح من الجدول الآتى :

كثافة الفيض جاوس	النسبة بين الإتساعين			
	الثالثة / الأساسية	الخامسة / الأساسية	السابعة / الأساسية	التوافقية التاسعة / التوافقية الأساسية
10000	—0.162	0.050	0.011	0.009
12000	—0.287	0.094	—0.013	0.010
14000	—0.528	0.267	—0.113	0.062
16000	—0.658	0.331	—0.121	0.031
18000	—0.658	0.275	—0.053	—0.018

ونظراً لأن التوافقية الثالثة هى أبرز هذه التوافقيات ، فسوف ندرس تأثير وجودها على خواص معينة للمحول ، وذلك فى الحالات المختلفة ، مع اعتبار أن شكل موجة ضغط الينبوع يكون جيبيا ، وأن هبوط الضغط فى المحول يكون صغيرا نسبيا ، مما يستلزم الأخذ بمبدأ كون منحنى القوة الدافعة الكهربية على طرفى الملف الابتدائى ذا شكل جيبى ، حتى يمكن أن يتعادل مع ضغط الينبوع* .

* وقد يتسبب مرور تيار المغطسة ، الذى يختلف منحناه عن الشكل =

١ — فى حالة المحول مفرد المرحلة :

نظرا لخلو منحنى ضغط الينبوع من توافقية ثالثة ،كما فرضنا ، فان تمرير توافقية التيار الثالثة فى المحول ، يستدعى وجود توافقية ضغط ثالثة فى منحنى القوة الدافعة الكهربية ، ناشئة عن توافقية فيض مغناطيسى ثالثة ، مما يستدعى الأخذ بمبدأ وجود تشويه فى منحنى الفيض المغناطيسى الجيبى ، على عكس ما فرضناه فى البداية . هذا ويجب أن تكون توافقية الضغط الثالثة هذه قادرة على تمرير توافقية التيار الثالثة فى الملف الابتدائى للمحول والينبوع ، من ناحية ، ثم فى الملف الثانوى ومعاوقة الحمل من الناحية الأخرى . وعلى العموم فانه إذا أمكن تصغير المعاوقة ، التى تقابلها التوافقية الثالثة للتيار ، إلى درجة كبيرة ، فان توافقية الضغط الثالثة ، المطلوبة فى منحنى القوة الدافعة الكهربية ، سوف تصبح صغيرة جدا ، مما يجعلنا نعتبرها مهملة ، ونتجاوز ، فى هذه الحالة ، عن وجود تشويه فى منحنى الفيض المغناطيسى ، الذى اعتبرناه جيبيا ، بسبب وجود التوافقية الثالثة للتيار . وينصب هذا الكلام أيضا ، بطبيعة الحال ، على أية توافقية أخرى ، بأية درجة .

٢ — فى حالة المحول ثلاثى المراحل :

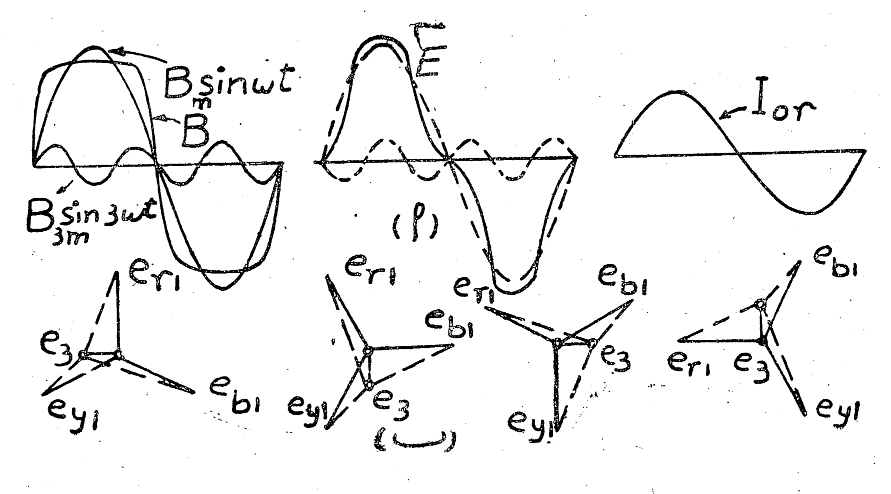
يجب التفرقة ، فى هذه الحالة ، بين ثلاثة محولات ، كل منها مفرد المرحلة ،

= الجيبى ، فى ممانعة التزامن للمولد ، وممانعة الخط الواصل بين المولد والمحول ، فى عمل هبوط ضغط ، يؤدى طرحه من القوة الدافعة الكهربية للمولد ، ذات الشكل الجيبى ، إلى إعطاء منحنى ضغط طرفى للمولد ، وهو الضغط على الملف الابتدائى ، يختلف عن الشكل الجيبى . ويتوقف مقدار التشويه فى منحنى الضغط ، فى هذه الحالة ، على مقدار التشويه فى تيار المغطسة .

موصلة معا للحصول على المحول الثلاثى ، ومحول واحد ثلاثى المراحل ، بطبيعته . ففى الحالة الأولى تكون الدائرة المغناطيسية للمحولات الثلاثة منفصلة عن بعضها البعض تمام الانفصال ، بينما تكون الدوائر المغناطيسية للمراحل الثلاث متشابكة معاً ، على قلب حديدى مشترك ، فى الحالة الثانية . هذا وتكون الدوائر الكهربية للمراحل الثلاث متشابكة معا فى الحالتين .

سوف نفترض فى كل ما يأتى أن منحنى ضغط الينبوع ذو شكل جيبى ، فى المراحل الثلاث ، وأن الأحمال متزنة ، ويكون توصيل مراحل الينبوع والأحمال نجمة دائما ، بينما تختلف الأمور ، من حالة إلى حالة ، تبعا لطريقة توصيل مراحل المحول نفسه على الجانبين ، الابتدائى والثانوى . نبدأ أولا بثلاثة محولات مفردة المرحلة :

أ — <u>عندما تكون المحولات موصلة دلتا/دلتا :</u> تكون ضغوط التوافقيات الثالثة ، فى المراحل الثلاث ، فى اتفاق مرحلى معا ، فتعمل على تمرير تيار



شكل (٢ ٩)

النوافقية الثالثة داخل الدلتا . ويمتص هبوط الضغط ، الناشىء عن مرور هـذا التيار ، توافقية الضغط الثالثة فى كل مرحلة ، فلا تظهر توافقيات الضغط الثالثة فى الضغوط الخطية (راجع من صفحة ٧٦ إلى صفحة ٧٩) . وبذلك نجد أن منحنى كل من الضغط والتيار الابتدائيين يكون جيبى الشكل ، كما أن منحنى الفيض المغناطيسى يكون أقرب ما يمكن إلى الشكل الجيبى ، فى حين تمر توافقية التيار الثالثة داخل الدلتا ، ولا تؤثر على الضغوط الخطية .

ب ــ عندما تكون المحولات موصلة نجمة/دلتا أو دلتا/نجمة ، بدون خط تعادل : عند عدم وجود خط تعادل نحصل على نفس السلوك ،فى هذه الحالة ، مثل الحالة السابقة . غاية ما فى الأمر أن وجود الدلتا، على ناحية واحدة فقط ، يؤدى إلى زيادة فى قيمة المعاوقة ، التى تقابلها توافقية التيار الثالثة ، أثناء مرورها حول هذه الدلتا ، مما يؤدى إلى ضرورة زيادة التشويه فى الشكل الجيبى ، لمنحنى الفيض المغناطيسى ، فى هذه الحالة ، عن الحالة السابقة .

حـ ــ عندما تكون المحولات موصلة نجمـة/نجمـة ، بدون خط تعادل : تتعادل توافقيات الضغط الثالثة ، لتوافقها مرحليا معا ، بالنسبة لكل مرحلتين ، فلا تظهر فى الضغوط الخطية ، كما يتعذر بذلك مرور تيار التوافقيـة الثالثة ، فتتعذر عملية التعويض ، السابق شرحها ، التى تعمل على الاحتفاظ بمنحنى الفيض المغناطيسى أقرب ما يمكن إلى الشكل الجيبي . لذلك يكون تيار المغطسة ذا شكل جيبي ، بينما يختلف منحنى الفيض المغناطيسى ، فى هذه الحالة ، عن الشكل الجيبى ، فيصبح مسطحا عند القمة ، ونحصل على منحنى حاد القمة للقوة الدافعة الكهربية ، كما هو مبين فى شكل (٢ ــ ٩ أ) . ويكون هناك توازن إذا بين ضغط الينبوع

والقوة الدافعة الكهربية ، بالنسبة للخطوط ، بينما ينعدم هذا التوازن بالنسبة للمراحل ، مما يؤدى إلى عدم استقرار ضغط نقطة التعادل عند قيمة معينة ، وتذبذبها بين قيم مختلفة ، نتيجة لتغير قيم الضغوط المرحلية ، كما هو مبين فى شكل (٢—٩ب) . تبين المتجهات e_{r1} ، e_{y1} و e_{b1} ، فى هذا الشكل ، القوى الدافعة الكهربية المتوازنة ، فى المراحل الثلاث ، بالنسبة للتوافقية الأساسية ، بينما يبين المتجه e_3 القوى الدافعة الكهربية المتفقة مرحليا ، فى المراحل الثلاث ، بالنسبة للتوافقية الثالثة ، وذلك فى أربع لحظات مختلفة متتالية . ويؤدى جمع التوافقية الأساسية مع التوافقية الثالثة ، فى كل مرحلة ، إلى إعطاء الضغط على طرفى ملف هذه المرحلة ، كما هو مبين بالخطوط المتقطعه .

د — عندما تكون المحولات موصلة نجمة/نجمة ، مع وجود خطى تعادل على الناحيتين : يؤدى وجود خط التعادل ، فى كل ناحية ، إلى وجود مسار لمرور تيارات التوافقية الثالثة ، فى اتفاق مرحلى ، فى هذين الخطين ، على الجانبين ، فتصبح هذه الحالة مماثلة للحالة أ تماما .

هـ — عند وجود ملفات ثالثة موصلة دلتا : يمكن فى هذه الحالة استخدام أية طريقة من طرق التوصيل السابقة ، مع الاطمئنان بوجود المسار اللازم ، أو جزء منه ، لتيارات التوافقية الثالثة ، والحصول على منحنى للفيض المغناطيسى أقرب ما يمكن إلى الشكل الجيبى ، فى أية حالة منها .

بالنسبة للمحول ثلاثى المراحل ، القائم بذاته ، يتوقف الأمر على تكوين القلب الحديدى ، لذلك يجب أن نفرق بين الأنواع الثلاثة المعروفة ، كما يأتى :

أ — فى حالة المحول الهيكلى (shell type transformer) : نجد أن

الدوائر المغناطيسية للمراحل الثلاث مستقلة عن بعضها البعض ، كما هو الحال في المحولات مفردة المرحلة ، عند توصيلها لتكوين محول ثلاثي المراحل . لذلك ينصب عليها جميع ماسبق شرحه بالنسبة لهذه المحولات من أ إلى هـ .

ب — في حالة المحول ذي القلب الحديدي (core type transformer)

نجد أن توافقيات الفيوض ذات الدرجة الثالثة تكون ذات إتجاه واحد في السيقان الثلاثة ، مما يؤدي إلى أن كلامنها لايجد مسارا للرجوع في أي من الساقين الآخرين ، فيتخذ مساره في الهواء (أو الزيت) ، أو في أي أجزاء حديدية منه ، مثل جدران الصهريج (Tank) ، الذي يحتوي على المحول . وينتج عن ذلك الحد من قيمة هذه الفيوض ، نظرا لزيادة المعاوقة المغناطيسية في مساراتها ، مما ينحو بمنحنى الفيض المغناطيسي ، والقوة الدافعة الكهربية ، نحو الشكل الجيبي ، في هذه الحالة . وقد وجد أن مسار الفيوض ذات الدرجة الثالثة في جدران الصهريج يتسبب عنه حدوث مفقودات حديدية في هذه الجدران ، كما أنه يمكن زيادة الحد من قيمة هذه الفيوض ، باستخدام حلقة من النحاس تحيط بالمحول ، فتعمل التيارات التي تنتجها الفيوض في الحلقة على ملاشاتها .

وتتلخص مساوىء وجود توافقيات التيار في المحولات في مفقودات النحاس الزائدة التي تنشأ عنها ، وكذلك مفقودات الحديد التي سبقت الاشارة اليها ، وفي القلب الحديدي نفسه . كما يحتمل حدوث تداخل مغناطيسي بينها وبين دوائر الاتصالات السلكية يؤثر على هذه الدوائر تأثيراً غيرمرغوب فيه . أما مساوىء توافقيات الضغط في المحولات ، فهي أنها تتسبب في زيادة الاجهادات الكهربية في المواد العازلة ، كما أنها تحدث تداخلا كهرواستاتيكيا مع دوائر الاتصالات السلكية ، مما يؤثر على هذه الدوائر تأثيرا سيئا هذا علاوة على أنه قد يحدث

رنين بالنسبة لتردد هذه الضغوط مع تردد الدائرة، التي تحتوى على معامل الحث الذاتى لملفات المحول، والسعة الخاصة بخط التغذية المتصل به .

ثانيا — المتلاشيات (Transients) :

دأبنا فى دراساتنا السابقة على الاهتمام بحالات الدوام (steady state) فقط ، والاشارة إلى حالات التلاشى (Transient condition) كلما دعا الأمر إلى ذلك ، عند الانتقال من حالة دوام إلى أخرى ، بحيث يظهر تأثير حالة التلاشى المتوسطة فى حالة الدوام اللاحقة ، كما حدث عند شرح اتزان الآلات المتزامنة . ولكننا قد نحتاج فى بعض الأحوال إلى الاهتمام بحالات التلاشى ، التى تسبق عادة حالات الدوام ، بسبب ما يمكن أن يحدث فى أثنائها ، مما قد يعرض بعض الأجهزة للخطر ، مثل زيادة التيار بصورة تزيد من خطر سخونته على بعض الأجزاء فى هذه الأجهزة ، أو ارتفاع الضغط بصورة مفاجئة ، تشكل خطرا على المواد العازلة . وينصب هذا على حالات التلاشى فى المحولات ، التى يمكن تقسيمها إلى نوعين ، يمكن التمييز بينهما ، وهما حالات تلاشى التيار ، وحالات تلاشى الضغط .

١ — تلاشى التيار فى المحولات :

(current transients in transformers)

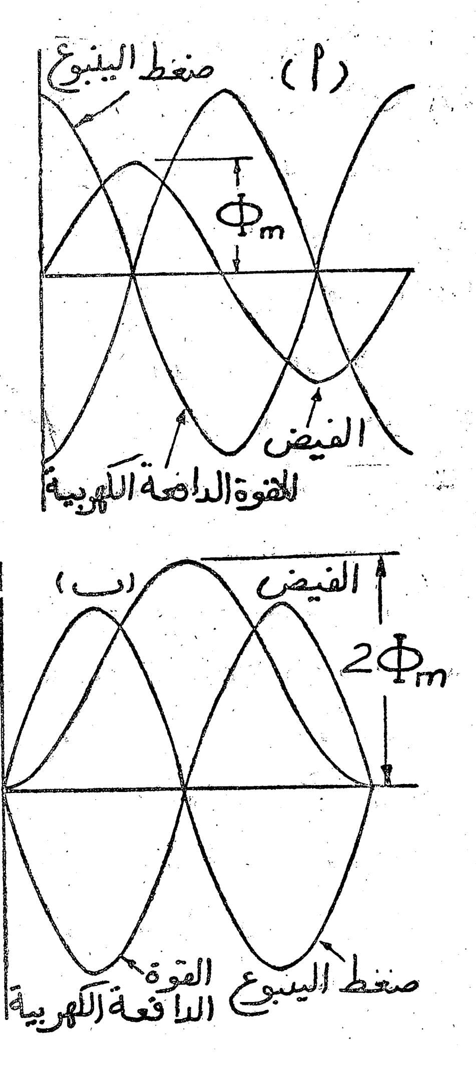
تحدث حالة تلاشى للتيار فى المحول ، تستدعى الاهتمام ، عند توصيل الملف الإبتدائى إلى الينبوع ، بينما يكون الملف الثانوى مفتوحا (open circuited) . ويختلف مدى الخطورة فى هذه الحالة على موضع الضغط اللحظى (instantaneous voltage) فى دورة الضغط الابتدائى (primary voltage cycle) عند توصيل المحول على الينبوع . ويوجد ، على هذا الأساس ، حالتان متطرفتان

(two extreme conditions) ، نبحث كل منهما على حدة :

أ — التوصيل عندما يكون ضغط الينبوع مارا بقيمة النهاية العظمى له :

هذا يعنى أن القوة الدافعة الكهربية يجب أن تتواجد بقيمة النهاية العظمى لها أيضا ، لمعادلة ضغط الينبوع (باعتبار أننا نهمل هبوط الضغط فى المقاومة ومعانعة التسرب للمحول فى هذه الحالة) ، مما يستدعى وجود النهاية العظمى لمعدل تغير خطوط القوى المغناطيسية فى القلب الحديدى ، فى نفس اللحظة . وبمراجعة منحنيات ضغط الينبوع ، مع القوة الدافعة الكهربية ، والفيض المغناطيسى فى القلب الحديدى للمحول ، فى حالة الدوام ، شكل (٣ — ٩ أ) نجد أن الأمور تكون مستتبة ، فى حالة الدوام ، على الأوضاع المطلوب توافرها فى لحظة التوصيل ، مما يجعل المحول يدخل فى حالة الدوام مباشرة ، دون أية حاجة إلى حالة تلاشى ، تمهد له السبيل اليها .

ب — التوصيل عندما يكون ضغط الينبوع مارا بقيمة الصفر : يجب أن تبدأ القوة الدافعة الكهربية المضادة ، التى تنشأ لمعادلة ضغط الينبوع ، بقيمة الصفر ، وتزداد قيمتها السالبة ، تبعا لزيادة قيمة ضغط الينبوع الموجب ، حتى يصلا معا إلى قيمة النهاية العظمى ، كما هو مبين فى شكل (٣ — ٩ ب) . وتطبيقا لقانون التأثير الكهرومغناطيسى ($e = -N \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8}$ ، هندسة الآلات الكهربية صفحة ١٠٢) يجب أن يبدأ الفيض المغناطيسى فى القلب الحديدى للمحول ، فى هذه الحالة ، بحيث يكون $\frac{d\phi}{dt}$ يساوى صفرا ، و ϕ أيضا يساوي صفرا ، ثم تزداد قيمة $\frac{d\phi}{dt}$ حتى تصل إلى أقصى قيمة لها ،



شكل (٣—٩)

عندما يصل الضغط والقوة الدافعة الكهربية إلى قيمة النهاية العظمى لها ، بعد ربع دورة . وفى ربع دورة التالى تقل قيمة $\frac{d\phi}{dt}$ ، مع استطراد الزيادة فى قيمة ϕ ، حتى يصل الضغط والقوة الدافعة الكهربية إلى قيمة الصفر مرة أخرى ؛ حيث تكون

ϕ قد وصلت إلى أقصى قيمة لها ، و $\frac{d\phi}{dt}$ قد وصلت إلى قيمة الصفر مرة أخرى . وبتتبع سير الأحداث ، على هذا النحو ، فى شكل (٣ — ٩ب) ، نجد أن قيمة الفيض المغناطيسى ، فى القلب الحديدى للمحول ، تصل إلى ضعف قيمة النهاية العظمى لها فى حالة الدوام ϕ_m ، التى حصلنا عليها فى شكل (٣ — ٩ أ) ، وذلك بعد نصف دورة من بداية حالة التلاشى ، التى تصاحب التوصيل إلى الينبوع . ويقال إننا نحصل على تأثير تضاعفى (doubling effect) فى هذه الحالة .

ونظراً لحالة التشبع الهائلة ، التى يصل اليها القلب الحديدى ، عند هذه القيمة الكبيرة جدا للفيض المغناطيسى ، فانه بينما يكون تيار التمغطس ، فى الأحوال العادية للمحول ، حوالى من 5 % إلى 10 % من تيار الحمل الكامل ، قد تصل قيمة تيار التمغطس ، فى هذه الحالة ، إلى عدة مرات من قيمة تيار الحمل الكامل . وعلى العموم تعمل مقاومة الملفات ، وممانعة التسرب لها ، بما تسببه من هبوط كبير فى الضغط ، مع مرور التيارات الكبيرة ، وكذلك مفقودات النحاس ومفقودات الحديد ، المصاحبة لهذه الظواهر كلها ، على الحد من قيمة الفيض المغناطيسى ، فلا يصل إلى ضعف القيمة بالضبط ، بل أقل من ذلك ، والحد من قيمة تيار التلاشى ، الذى يمر عند توصيل المحول إلى الينبوع . كذلك لا يجب أن نتوقع دائما أسوأ الاحتمالات ، إذ يندر ، فى الغالب ، أن يكون توصيل المحول إلى الينبوع فى اللحظة التى يمر بها الضغط بقيمة الصفر بالضبط ، وإنما الاحتمال الأكبر أن تقع قيمة الضغط بين الصفر والنهاية العظمى ، مما يجعلنا نحصل على قيمة محتملة لتيار التلاشى ، رغما عن كبرها . وعلى العموم يجب على المصمم أن يعد نفسه لجميع الاحتمالات . وإن أسوأ ما فى الأمر ، فى الواقع ، أن يكون فى القلب الحديدى للمحول كمية من المغناطيسية المتبقاه ، التى تعطى فيضا مغناطيسيا

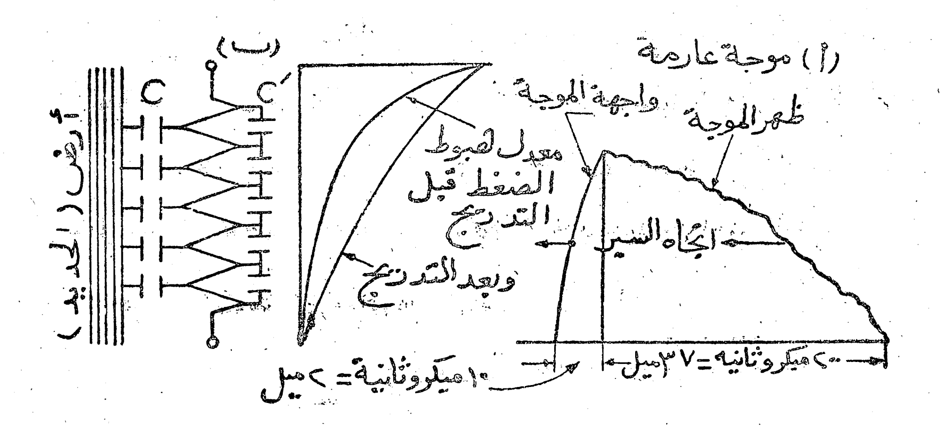
فى نفس إتجاه الفيض المغناطيسى الناشىء فى فترة التلاشى . هذا ويمكن تدبير الوقاية من تيارات التلاشى الخطرة ، التى يمكن أن تصاحب توصيل المحول إلى الينبوع ، بوضع متمم التيار الزائد (over - current relay) فى الدائرة ، وهو يعمل على منع توصيل المحول ، عند مرور أى تيار يزيد عن الحد المأمون .

٢ — الضغوط العارمة فى المحولات :

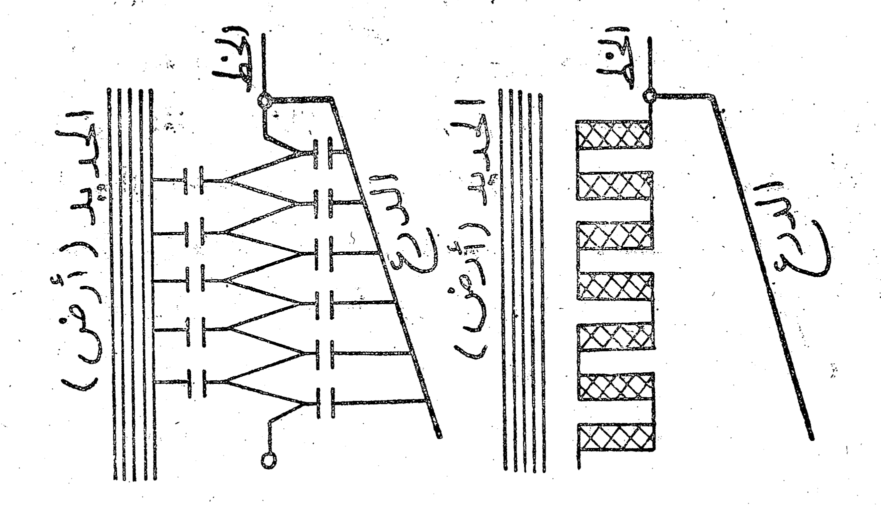
(Surge voltages in transformers) :

تتعرض المحولات ، الموصلة على أطراف خطوط النقل الكهربية ، لموجات من الضغوط العارمة ، التى تنشأ فى هذه الخطوط ، ثم تنتقل بسرعة الضوء إلى أطرافها ، حيث تنتشر على ملفات الضغط العالى للمحول ، متسببة فى وجود حالة تلاشى ، يتغير فى أثنائها توزيع الضغط على هذه الملفات ، بمعدلات قد ينجم عن علوها آثار وخيمة العواقب بالنسبة للمحول . وقد تنشأ موجات الضغط العارمة هذه فى الخطوط الكهربية عند قفل مفاتيح التزامن ، أو بسبب الأخطاء (faults) التى تحدث فيها ، أو بفعل الظروف الجوية ، مثل تفريغ البرق الكهربائى . ويتركز خطر هذه الموجات فى أنها تمتلك عادة واجهة شديدة الانحدار (steep wave front) ، قد يبلغ معدل تغير الضغط فيها عدة مئات من المرات مثل معدل الضغط العادى ، كما يتضح من منحنى احدى هذه الموجات ، المبين فى شكل (٤ — ٩ أ) .

يكون توزيع ضغط مثل هذه الموجات العارمة على ملفات المحول ، على حسب السعة بين كل منها والأرض c ، والسعة بين بعضها البعض c′ شكل (٤ — ٩ ب) ، وليس على حسب المقاومة أو الممانعة الحثية ، وذلك نتيجة لمعدل تغيرها الكبير ، الذى يجعل ممانعة المكثف صغيرة جدا بالنسبة للمقاومة أو الممانعة الحثية . هذا



شكل (٤ — ٩)



شكل (٥ — ٩)

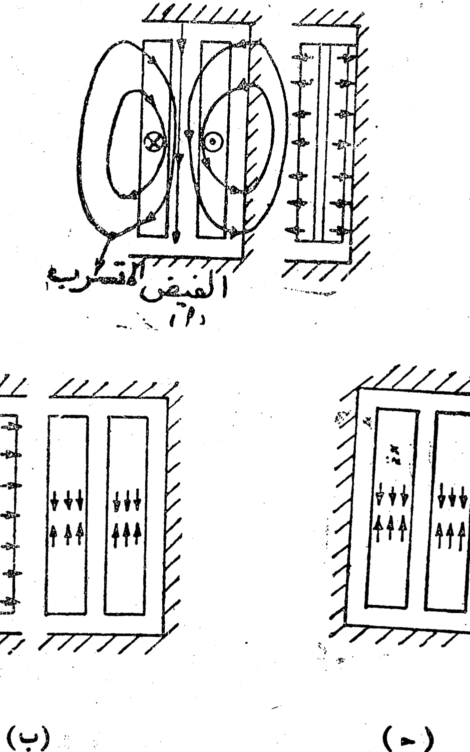
كما أن توزيع الضغط لا يكون متساويا على الملفات ، لنفس السبب ، فيكون نصيب الملفات الطرفية (end coils) كبيرا ، بينما يتضاءل الضغط على باقى الملفات ، كما هو واضح من منحنى توزيع الضغط على الملفات ، المبين فى شكل (٤ — ٩ ب) وقد يتسبب وجود الضغط العالى ، بدرجة غير طبيعية ، على الملفات

الطرفية ، فى أثناء فترة التلاشى ، التى تصاحب قدوم موجة الضغط العارمة ، حتى يتم تخميدها ، فى انهيار عازل هذه الملفات ، ونشوء دائرة قصر . ويمكن تدبير الوقاية من اخطار موجات الضغط العارمة بتقوية عزل الملفات الطرفية (حوالى 5 % من الملفات) ، بحيث يمكن أن تتحمل هذه الضغوط غير العـــادية ، ثم باستخدام وسائل الوقاية ، التى تعمل على امتصاص الطاقة الموجودة فى الموجة العارمة ، وتخميدها ، مع العمل على تسربها إلى الأرض . كذلك يمكن مساواة التوزيع فى الضغط (تدريج الضغط) على الملفات ، على طول ملف الضغط العالى ، فى محولات القلب ، التى تستخدم فيها ملفات اسطوانية ، باستخدام درع معدنى ، (metallic shield) ، تعمل سعته مع الملفات على معادلة سعته مع الأرض ، كما هو مبين فى شكل (٥ — ٩) .

ثالثا : القوى الميكانيكية المؤثرة على الملفات :

(Mechanical forces acting on coils) :

سبق أن بينا أنه عند تحميل المحول يكون تيار الحمل فى الملف الثانوى ، ومركبة التيار ، التى تسرى بسببها فى الملف الإبتدائى ، فى اتجاهين متضادين ، مما يؤدى إلى اعطاء قوتين دافعتين مغناطيسيتين متعادلتين ، من الملفين ، وذلك بالنسبة للفيض المغناطيسى فى القلب الحديدى . أما بالنسبة للحيز الموجود بين الملفين ، وهو ما يكون الجزء الرئيسى فى مسارات تسرب الفيض (pathes of leakage fiux) ، فاننا نجد أن هاتين القوتين الدافعتين المغناطيسيتين تعطيان فيضا مغناطيسيا فى نفس الإتجاه ، وهذا هو الفيض المتسرب ، الذى يتسلسل (likns) جزء منه مع أحد الملفين فقط ، ويتسلسل الجزء الآخر مع الملف الآخر ، فقط ، أيضا شكل (٦ — ٩ أ) . ويكون نتيجة هذا التسلسل الجزئى للفيض ، مع أحد الملفين

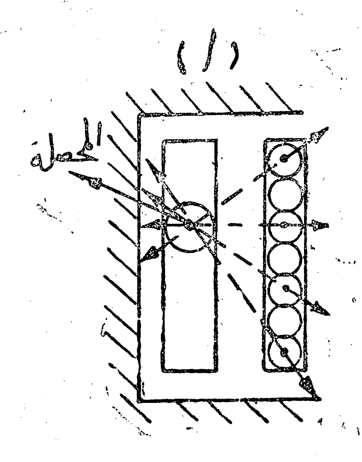


شكل (٦ — ٩)

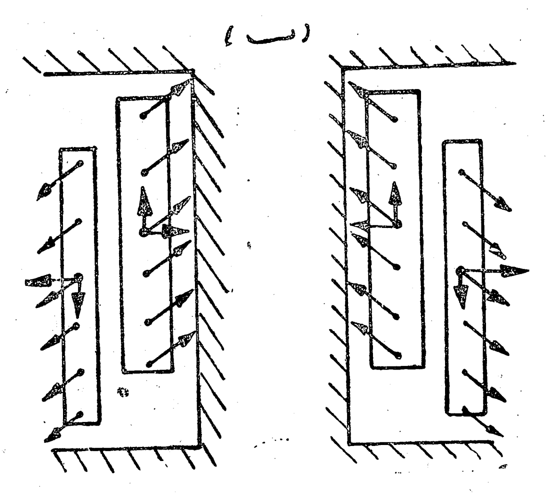
فقط ، ظهور ممانعة التسرب لهذا الملف ، كما سنشرح بالتفصيل فيما بعد . وعلاوة على ذلك ينتج عن وجود القوتين المغناطيسيتين المتضادتين ، للملفين الابتدائى والثانوى ، قوى ميكانيكية تؤثر عليهما ، وقد تتسبب فى تمزيقهما ، عندما يزداد التيار بصورة كبيرة ، فى حالة وجود دائرة قصر على المحول ، إذا كان ضخما .

تتوقف إتجاهات القوى، المؤثرة على الملفات، على اتجاهات التيارات فى أجزائها المختلفة . ويمكن ، بناء على ذلك ، التمييز بين حالتين أساسيتين ، وهما عندما يكون ملف الضغط العالى والمنخفض متساويين فى الطول ، وهى حالة التماثل (symmetry) بينهما ، وعندما يكون الملفان غير متساويين فى الطول ، وهى

(أ)



(ب)



شكل (٧ — ٩)

حالة عدم التماثل (dissymmetry) بينهما .

١ — **حالة التماثل** : ونجد فيها نوعين من القوى التى تؤثر على الملفات ، وهى :

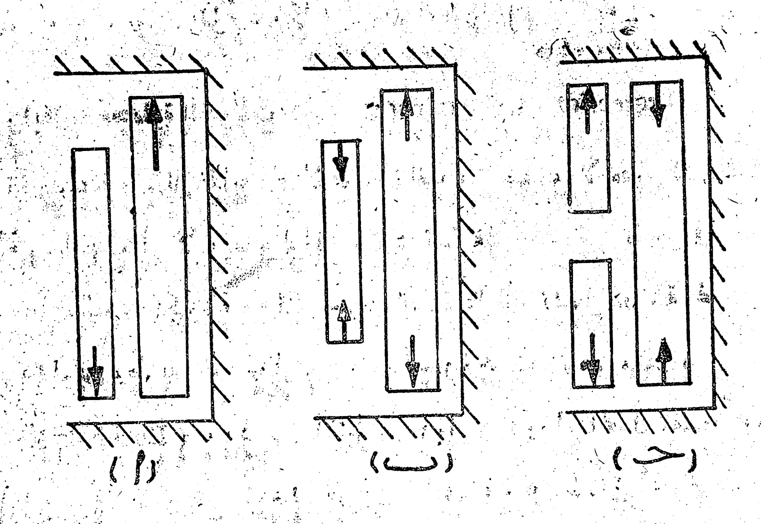
أ — توجد بين موصلات الضغط العالى وموصلات الضغط المنخفض ، التى تقع فى نفس المستوى الأفقى قوى تنافر بسبب اختلاف اتجاه التيار فيها (شكل

(٨—٢) كتاب هندسة الآلات الكهربية) . ويمكن حساب قوى التنافر هذه على أساس المعادلات التي استخدمناها لحساب قيمة القوة بين موصلين يحملان تيارين مختلفي الإتجاه (هندسة الآلات الكهربية صفحة ٥٦ — ٥٨) . هذا وتؤثر قوى التنافر على الملف الداخلي ضاغطة عليه في اتجاه القلب الحديدي ، بينما تؤثر على الملف الخارجي ضاغطة عليه ناحية الخارج ، محاولة تكبير قطره، كما يتبين من شكل (٦ — ٩ب) . ويكون الشكل الدائري للملفات هو أصلح تكوين لاحتمال مثل هذه الاجهادات ؛ ينشأ كذلك عن قوى التنافر بين كل موصل في أحد الملفين وجميع الموصلات في الملف الآخر قوة تنافر محصلة تعطى مركبتها الأفقية نفس التأثير المذكور ، بينما تعمل المركبة الرأسية على إطالة الملفات ، شكل (٧ — ٩أ). هذا وتزداد قيمة المركبة الأولى ، وتقل قيمة الثانية في اتجاه منتصف الملف .

ب — توجد بين موصلات كل من ملفي الضغط العالي والضغط المنخفض قوى تجاذب بسبب اتفاق إتجاه التيار فيها (شكل (٧ — ٢) كتاب هندسة الآلات الكهربية) . وتعمل قوى التجاذب هذه على كبس الملف في محاولة لتقصيره وسحقه شكل (٦ — ٩حـ)، ويمكن للملفات احتمال مثل هذه القوى في حالة حدوث دائرة قصر .

٢ — **حالة عدم التماثل** : يختلف تأثير القوى، في هذه الحالة، على حسب نوع عدم التماثل الموجود ، حيث يمكن التمييز بين أربع حالات على النحو التالي:

أ — عندما يكون الملفان متساويين في الطول ، ولكن اختلف وضع أحدهما بالنسبة للآخر ، كما هو مبين في شكل (٧ — ٩ب) . توجد بين موصلات الضغط العالي وموصلات الضغط المنخفض قوى تنافر تكون مائلة ، بسبب عدم تماثل وضع الملفين .



شكل (٨ — ٩)

ويمكن فى هذه الحالة تحليل هذه القوى إلى مركبتين ، احداهما تقوم بنفس دور قوى التنافر ، السابق ذكرها ، بينما تحاول الثانية أن تعمل على تحريك الملفين فى اتجاهين متضادين ، مما يزيد فى عدم تماثل وضعها ، كما هو واضح فى شكل (٧ — ٩ب) . وتنتقل هذه القوى المحورية إلى الدعامات الطرفية التى أعدت لتحملها .

ب — عندما يختلف طولا الملفين ويتماثل وضعهما من ناحية ، ويختلف من الناحية الثانية ، كما هو مبين فى شكل (٨ — ٩ أ) ، توجد فى هذه الحالة قوى ضاغطة على الدعامات الطرفية تتوقف قيمتها على مقدار الفرق بين طولى الملفين .

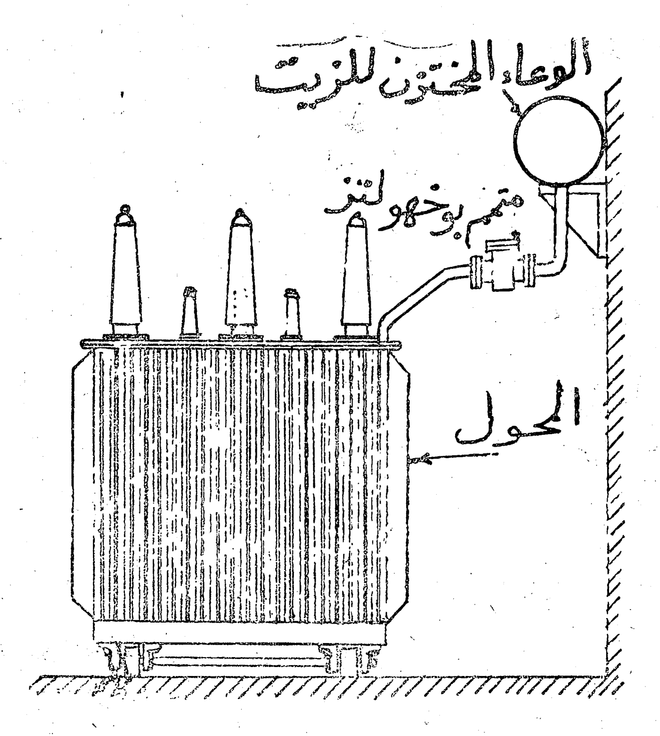
حـ — عندما يختلف طولا الملفين ، ويتماثل وضع أحدهما بالنسبة للآخر ، تكون القوى المؤثرة ، كما هو مبين فى شكل (٨ — ٩ب) .

د — عندما ينقسم أحد الملفين إلى قسمين يتماثل وضعهما بالنسبة للملف الآخر

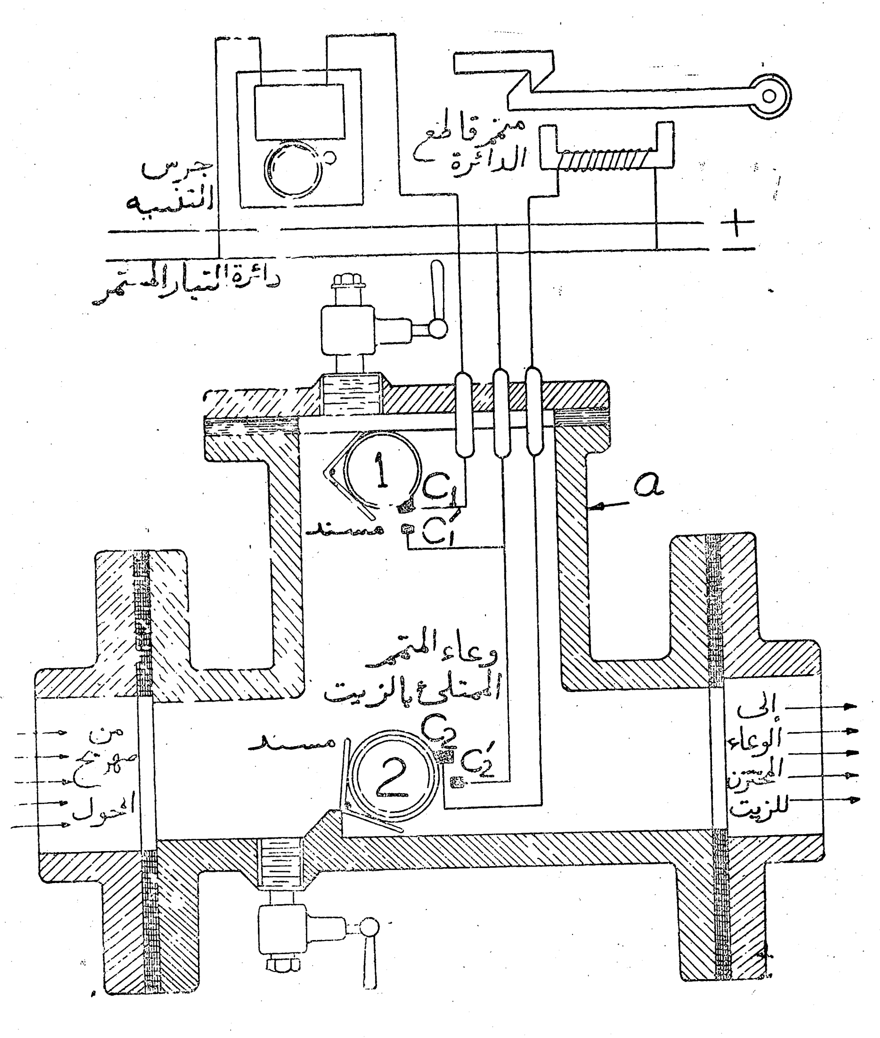
تكون إتجاهات القوى المؤثرة ، كما هو مبين فى شكل (٨ـــ٩ ح) .

رابعا — حماية المحولات : Protection of the transformers

توجد عدة وسائل لحماية المحولات ، تختلف على حسب الأخطاء التى تتوقع حدوثها ، لسبب أو لآخر . والواقع أن دراسة هذه الوسائل تدخل فى نطاق علم محطات القوى الكهربية ، ولكن جرت العادة على أن تشمل دراسة المحول على وصف تكوين وطريقة عمل جهاز واحد من أجهزة حمايته ، وهو متمم بوخهولتز (Buchholz Relay) ، وذلك باعتباره جزءا من أجزاء المحول نفسه . يبين شكل (٩ـــ٩ أ) موضع متمم بوخهولتز ، الذى يقع بين صهريج المحول الممتلىء بالزيت (transformer oil tank) ، والوعاء المختزن للزيت (oil conservator) ،



شكل (٩ ـــ ٩ أ)



شكل (٩ — ٩ب)

الذى يحتفظ فيه بسطح الزيت عند حد معين ، بعد امتلاء الصهريج والمتمم امتلاء تاما بالزيت ، وذلك فى ظروف التشغيل المعتادة . يبين شكل (٩ — ٩ب) تكوين متمم بوخهولتز ، وطريقة عمله لحماية المحول من إزدياد طارىء فى درجة الحرارة ، أو حدوث دائرة قصر . يتضح من الشكل أن وعاء المتمم الممتلىء

عادة بالزيت، يحتوى على عوامتين 1 , 2 تستند كل منهما إلى مسند (support) يمنعها من الحركة . ويوجد على العوامة الأولى طرف التلامس c_1 ، القريب من طرف التلامس المناظر له فى دائرة التيار المستمر c'_1 ، بينما يوجد على العوامة الثانية طرف التلامس c_2 ، وهو قريب من طرف التلامس المناظر له فى دائرة التيار المستمر c'_2 . إذا حدث خطأ طفيف فى المحول ، كأن يزداد الحمل عن الحد المقرر فى فترة محدودة ، مما يؤدى إلى زيادة درجة الحرارة ، تنشأ فقاعات غازية فى الزيت ، وتتصاعد فيه فى إتجاه سطحه فى الوعاء المختزن . وفى خلال صعود الفقاعات الغازية هذه ، وعبورها وعاء متمم بوخهولتز ، فانها تنحبس فى الجزء العلوى منه ، المشار اليه بالحرف a فى الرسم ، ضاغطة على سطح الزيت ، الذى ينحسر فى هذا الجزء ، لكى يترك مكانا لحلول الفقاعات ، مما يؤدى إلى ارتفاع سطح الزيت فى الوعاء المختزن ، وهبوط العوامة 1 ، مع هبوط سطح الزيت فى الجزء a من المتمم . بذلك يحدث التلامس بين c_1 , c'_1 ، ويدق جرس التنبيه ، معلنا وجود خطأ طفيف ، يجب البحث عنه ، ومحاولة منعه من الاستفحال . فاذا اشتدت وطأة الخطأ ، يزداد تبعا لذلك معدل تولد الفقاعات الغازية ، فتزداد كمية الغاز الذى ينحبس فى الجزء a . ويؤدى ذلك كله إلى قلقلة العوامة 2 من مكانها ، وحدوث التلامس بين c'_2,c_2 ، فتتمم الدائرة التى تؤثر على قاطع الدائرة ، وتعمل على فصل المحول آليا عن الينبوع . هذا ويمكن معرفة درجة خطورة الخطأ ، وسببه ، ومدى استمراره ، بمراقبة لون الفقاعات الغازية المتصاعدة ، ومعدل نشوئها ، من خلال نافذة صغيرة فى وعاء المتمم . فاذا كان لون الغاز يميل إلى البياض ، فان هذا يعنى حدوث تلف فى الورق العازل ، أما إذا كان يميل إلى الاصفرار ، فان التلف يكون فى الخشب عادة . ويشير لون الفقاعات الرمادى أو الاسود إلى حدوث تحلل فى الزيت نفسه .

خامسا — اختبار المحولات : (Transformer testing)

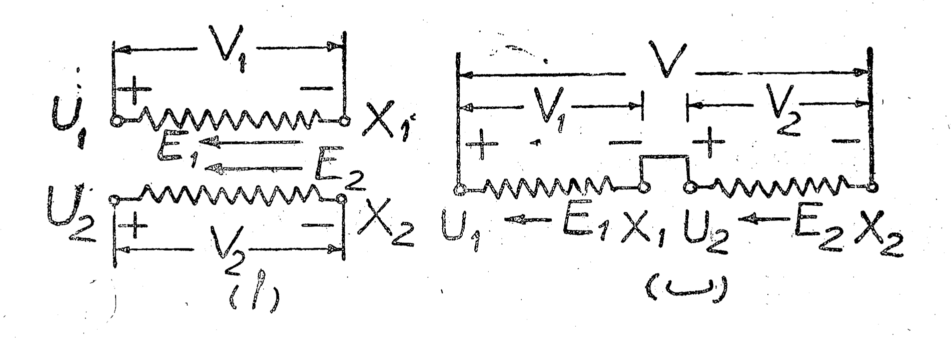
إن الأغراض التي يلزم من أجلها اجراء الإختبارات على المحولات متعددة ومختلفة ، فتجرى اختبارات روتينية (routine tests) على المحول قبل خروجه من المصنع ، كما تجرى عليه اختبارات معينة عند شرائه ، تمهيداً لقبوله أو رفضه (acceptance tests) . وقد يحتاج الأمر في بعض الأحيان إلى إجراء اختبار معين ، لتحديد خاصية معينة في المحول ، تتعلق بمنهاج تصميمه أو طريقة أدائه . وعلى العموم فاننا نستطيع تحديد عدد معين من الاختبارات ، ذات مواصفات معينة ، يمكن أن تخدم بعض هذه الأغراض ، أو كلها ، وتكون أساسا لأنواع الاختبارات المختلفة ، وذلك على النحو التالي :

١ — اختبارات الدائرة المفتوحة ودائرة القصر :

وقد سبق شرحها ، بالتفصيل ، وبيان النتائج المستفادة منها بالتفصيل .

٢ — تحديد المراحل :

في المحولات متعددة المراحل تتم تسمية أطراف المراحل المختلفة ، على



شكل (١٠ — ٩)

حسب نوع التوصيل ، بحيث يمكن تحديد الملفين الإبتدائى والثانوى لكل مرحلة بسهولة . ترى فى شكل (١ — ٨) ص ٣٩٠ ، مثلا ، أن الملفين الابتدائى والثانوى للمراحل الثلاث ، فى حالة التوصيل نجمة ، هما على الترتيب (N_1U_1 — N_2U_2) و (N_1V_1 — N_2V_2) و (N_1W_1 — N_2W_2) ، بينما يكونا فى حالة التوصيل دلتا (B_1R_1 — B_2R_2) و (Y_1B_1 — Y_2B_2) و (R_1Y_1 — R_2Y_2) على أساس التعاقب المرحلى W , V , U ثم Y , R , B فى الحالتين على الترتيب. فاذا لم يتيسر تحديد المراحل نتيجة لترقيمها ، على النحو الصحيح ، يمكن التوصل إلى ذلك بالتجربة ، فيوصل طرفا أحد الملفات الثانوية إلى فولتمتر ، ثم يوصل ينبوع تيار مستمر ، ذو ضغط مناسب ، بحيث لايمر تيار يزيد عن تيار الحمل الكامل ، إلى طرفى الملف الذى يظن أنه الملف الابتدائى المناظر . يمرر التيار ويقطع عدة مرات ، بقفل وفتح مفتاح الدائرة ، فاذا تحرك مؤشر الفولتمتر ، فى أثناء ذلك ، نكون قد عثرنا على الملف المنشود ، وإلا وجبت تجربة ملف آخر ، حتى نعثر عليه .

٣ — تحديد قطبية الملفات :

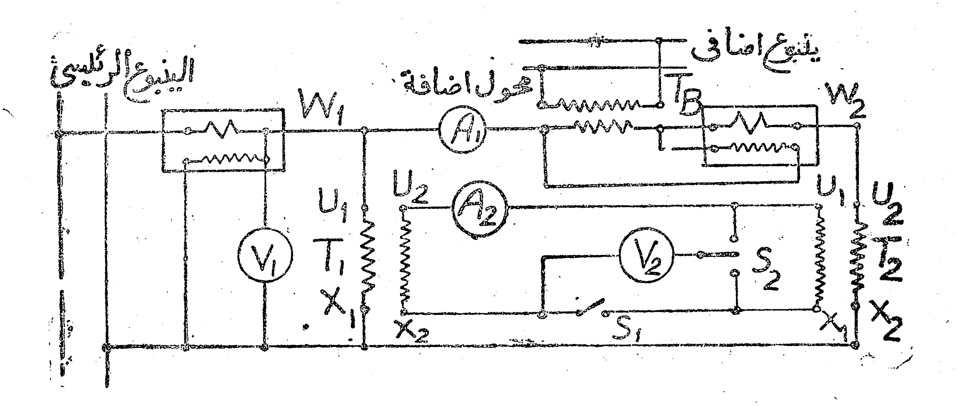
تنص المواصفات القياسية المتداولة (Standard specifications) على أن يتم ترقيم الملفين الابتدائى والثانوى ، على النحو السابق ، بحيث يكون إتجاه القوة الدافعة الكهربية فيهما ، فى نفس الاتجاه ، إذا بدأنا من طرفين متناظرين فى التسمية ، كما يتضح من شكل (١٠ — ٩ أ) حيث يكون إتجاه E_1 من X_1 إلى U_1 ، وإتجاه E_2 من X_2 إلى U_2 . وهذا يعنى أنه عندما يكون الطرف X_1 موجبا والطرف U_1 سالبا ، من ناحية الينبوع ، يكون الطرف X_2 موجبا ، والطرف U_2 سالبا ، ناحية الحمل . وعلى هذا الأساس وضعت الإشارات الموجبة والسالبة

فى شكل (٥ — ٨) مثلا . هذا ، ويمكن التأكد من صحة ترقيم الملفين ، على هذا النحو ، بتوصيل الملفين على التوالى ، كما هو مبين فى شكل (١٠ — ٩ب) ، إلى ينبوع التيار المتردد المعتاد ، حيث يجب أن يكون الضغط على طرفى الملف الابتدائى V_1 أصغر من ضغط الينبوع V ، فى هذه الحالة .

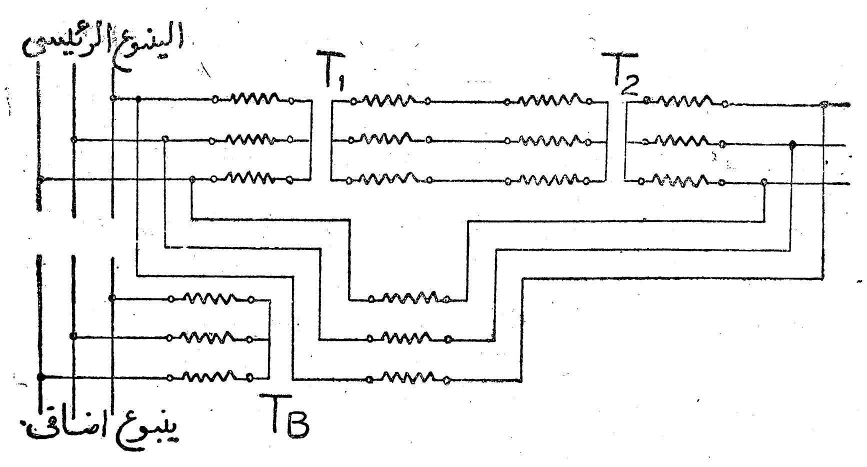
٤ — اختبار التوصيل المتضاد (Back to back test) :

إن الأصل فى فكرة اجراء الاختبار المتضاد ، كما سبق شرحه فى آلات التيار المستمر (هندسة الآلات الكهربية ض ٤٤٢) ، هو اختبار الآلة ، وهى فى ظروف الحمل الكامل ، مع تكبد نفقات مفقوداتها فقط . ويجب أن يكون لدينا ، فى هذه الحالة ، آلتان متماثلتان ، حتى يمكن توصيلها بالتضاد على الينبوع ، كما هو مبين فى شكل (١١ — ٩) ، بالنسبة لمحولين مفردى المرحلة ، وفى شكل (١٢ — ٩) ، بالنسبة لمحولين ثلاثى المرحلة .

ويلاحظ أنه ، بناء على ماجاء فى البند السابق ، لايمر أى تيار فى الدائرة المكونة



شكل (١١ — ٩)



شكل (١٢ — ٩)

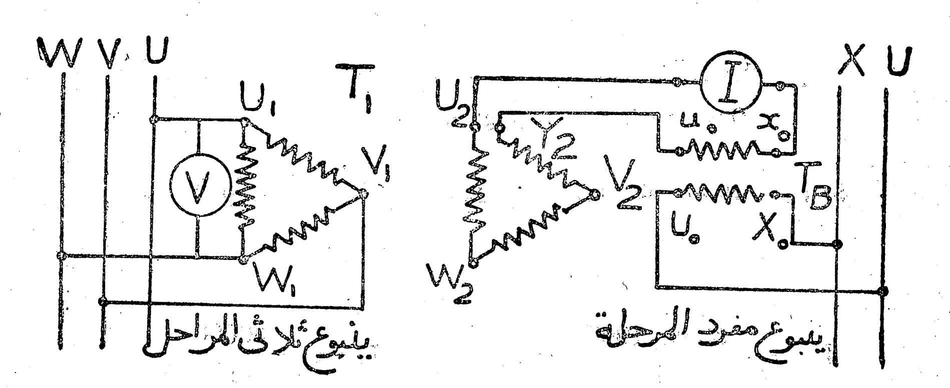
من الملفين الثانويين ، اللذين يولدان قيمتين متساويتين للقوة الدافعة الكهربية ، ويكونان موصلين بالتضاد ، فى هذه الحالة . ويجب التأكد من صحة التوصيل ، على هذا النحو ، بقياس الضغط V_2 ، على طرفى المفتاح S_1 ، قبل قفله ، الذى يجب أن يساوى صفرا ، فى هذه الحالة . ومن البديهى أن قراءة الواتمتر W_1 تعطى مجموع المفقودات الحديدية فى المحولين حينئذ ، أى ضعف مفقودات الحديد فى أحدهما ، بينما تكون قراءة W_2 صفرا . يستخدم محول الاضافة T_B لتمرير تيار الحمل الكامل فى المحولين ، وذلك بضبط قيمة ضغط الينبوع الاضافى ، الذى يغذى هذا المحول . وتكون هذه القيمة مساوية لمجموع هبوط الضغط فى المحولين معا ، عند الحمل الكامل ، وهبوط الضغط فى محول الاضافة ، عند التيار المار فيه . ويقرأ الواتمتر W_2 ، فى هذه الحالة ، قيمة مفقودات مربع التيار (I^2R losses) فى المحولين معاً ، عند تيار الحمل الكامل ، المار فى المحولين . هذا ، ونظرا لأن مهمة محول الإضافة تتعلق بالتيار المار فى المحولين ، ومفقودات مربع التيار ، ولا علاقة لها بمفقودات الحديد فى المحولين ، فليس من الضرورى أن يكون تردد الينبوع الاضافى ، الذى يغذى محول الاضافة ، مساويا للمقنن التردد للمحولين المختبرين بالتضاد.

يمكن الاستعاضة عن محول الاضافة ، لتمرير تيار الحمل الكامل فى المحولين ، بالعمل على انتفاء التوازن بين القوتين الدافعتين الكهربيتين المتضادتين ، فى الملفين الثانويين للمحولين ، الموصلين بالتضاد ، بالقدر الذى يسمح بمرور هذا التيار فيهما . ويكون ذلك بتغيير عدد اللفات ، فى الملف الثانوى لأحد المحولين ، وليكن T_2 مثلا ، باستخدام نقط التقسيم المتاحة على هذا الملف .

٥ — اختبار التيار الدائرى فى المحولات الموصلة دلتا / دلتا :

(Circulating current test in delta/delta connected transformers)

يعتمد هذا الاختبار على أساس فتح الدلتا فى الملف الثانوى للمحـــول ، وتوصيل ضغط مناسب ، من ينبوع تيار متردد اضافى ، يعمل على تمرير تيار الحمل الكامل فى المحول ، دون أن يوجد الحمل ، الذى يستهلك القدرة المصاحبة لمرور هذا التيار . يبين شكل (١٣ — ٩) طريقة التوصيل فى هذه الحالة ، وكما حدث فى حالة اختبار التوصيل المتضاد ، فان المحول المختبر يأخذ مفقودات



شكل (١٣ — ٩)

الحديد من الينبوع الرئيسى ثلاثى المراحل ، بينما يأخذ مفقودات النحاس من

الينبوع الاضافى ، مفرد المرحلة ، الذى لايحتاج أن يكون تردده مساويا لمقنن تردد المحول ، على هذا الاساس . والميزة الكبرى لهذا الاختبار أننا لانحتاج فيه إلى محول آخر ، يماثل المحول المراد اختباره ، ولكن عيبه أن يقتصر اجراؤه على المحولات الموصلة دلتا/دلتا فقط .

مثال (١) :

Two identical, 3 phase, 50 c/s, transformers; each rated 30 KVA, 6000/525 V, star/star, were subjected to a back to back test. With the secondary winding of one transformer being tapped at 94 % of its total turns, a current of 27 amps was made to circulate in each secondary phase. The power input measured by two wattmeters was 1250 W. If the iron losses per transformer were 315 W, find:

(a) the percentage impedance, reactance, and resistance drops for each transformer.

(b) the efficiency and percentage regulation for full load, 0.8 power factor lagging.

نحسب أولا تيارى الحمل الكامل I_1 ، I_2 فى الملفين الابتدائى والثانوى ، لكل محول :

$$I_1 = \frac{30 \times 1000}{\sqrt{3} \times 6000} = 2.88\text{A} \quad , \quad I_2 = \frac{30000}{\sqrt{3} \times 525} = 33 \text{ A}$$

حيث أن الملف الثانوى لأحد المحولين يحتوى على 94 % فقط من اللفات، فان هذا يعنى زيادة فى قيمة القوة الدافعة الكهربية للآخر بمقدار 6 % . أى أن 6 %

من قيمة الضغط عملت على تمرير تيار قيمته 27 أمبير فى معاوقة المحولين ، وهما فى الوضع المذكور . فاذا اعتبرنا أن خروج % 6 من ملفات أحد المحولين ، من الدائرة المتكونة من ملفات المحولين على التوالى معا ، وهما متصلان بالتضاد ، يخفض قيمة المعاوقة لهذا المحول بنفس هذه النسبة ، فان هذا يعنى أن % 6 من قيمة الضغط المقنن للمحول أدت إلى تمرير تيار مقداره 27 أمبير فى % 194 من معاوقة المحول الواحد : لذلك نجد أن تيار الحمل الكامل يمر فى معاوقة المحول الواحد ، عند عمل دائرة قصر عليه ، بنسبة مئوية من الضغط المقنن مقدارها :

$$I_2 Z_{2eq} \% = \frac{6}{1.94} \times \frac{33}{27} = 3.77$$

وهذه هى قيمة هبوط الضغط النسبى فى المعاوقة (percentage impedance drop) ثم باعتبار أن كلا من مقاومة ومعاوقة التسرب للمحول ذى نقط التقسيم قد انخفضت بمقدار % 6 ، فان مفقودات النحاس تنخفض فى هذا المحول بنفس النسبة . وبذلك نجد أن الـ 1550 وات عبارة عن ضعف مفقودات الحديد فى المحول الواحد ، مضافا اليها 1.94 من قيمة مفقودات النحاس للمحول الواحد أيضا ، عند مرور التيار 27 أمبير فيه .

$$\therefore \quad 1.94\, P_{cu} = (1250 - 630) \times \left(\frac{33}{27}\right)^2$$

$$P_{cu} = \frac{620 \times 1.5}{1.94} = 480 \text{ W}$$

$$I_2 R_{2eq} \% = \frac{100\, I_2 R_{2eq}}{V'_1} = \frac{3 I_2^2 R_{2eq} \times 100}{3 I_2 V'_1}$$

$$= \frac{P_{cu} \times 10^2}{KVA \times 10^3}$$

وبذلك يمكننا أن نحصل على قيمة هبوط الضغط النسبى فى المقاومة $I_2R_{2eq}\%$ (percentage resistance drop) من المعلومات المعطاة والمحسوبة ، حيث :

$$I_2 R_{2eq}\% = \frac{480 \times 10^2}{30 \times 10^3} = 1.6$$

ونحصل على قيمة هبوط الضغط النسبى فى ممانعة التسرب (percentage reactance drop) $I_2\ X_{2eq}\ \%$ ، بعد ذلك ، على النحو الآتى :

$$I_2 X_{2eq}\ \% = \sqrt{(\ I_2 Z_{2eq}\%\ )^2 - (\ I_2 R_{2eq}\%\ )^2}$$

$$= \sqrt{(\ 3.77\ )^2 - (\ 1.6\ )^2} = 3.42$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{cu} + P_{Fe}} = \frac{30 \times 1000 \times 0.8}{30 \times 1000 \times 0.8 + 480 + 315}$$

$$= \frac{24000}{24795} = 0.967 = 96.7\ \%$$

$$\varepsilon\ \% \simeq I_2 R_{2eq}\% \cos\phi + I_2 X_{2eq}\% \sin\phi$$

$$\simeq 1.6 \times 0.8 + 3.42 \times 0.6 = 3.33$$

وهذه هى قيمة معامل التنظيم المئوى (percentage regulation)

مسائل على الباب التاسع

What useful purposes does the back to back test serve in practice. Cive a connection diagram for two transformers in a back to back test including necessary measuring instruments and apparatus. What precautions should be taken in such a test ?

In a back to back test on two similar, star/star, 3-phase,

380/220 volt, 40 KVA transformers the two primaries are fed from a 3—phase, 380 volt supply while the secondaries are connected in series opposition. A current of 80 amp. is made to circulate in the secondaries, by tapping one secondary winding at 93 % of its number of turns. The sum of the readings of the two wattmeters connected to measure the power input is 1345 watts. If the iron loss of each transformer is 400 watts, calculate for full load of 40 KVA at 0.8 power factor ;

(a) the efficiency.

(b) the percentage impedance, reactance and resistance drops.

الباب العاشر

تصميم المحولات

(Design of Transformers)

الأبعاد الرئيسية للمحول :

يتبع تصميم المحولات منهاجا مماثلا لذلك الذى اتبعناه فى تصميم آلات التيار المستمر والآلات المتزامنة ، من حيث ارتباط الأبعادالرئيسية ، أوالأبعاد الرئيسية ، أو الأبعاد الموجهة ، للمحول، بالحمل النوعى المغناطيسى والحمل النوعى الكهربائى ، وهما اللذان يحددان مقادير الاجهادات ، التى تتعرض لها المواد الداخلة فى تكوين المحول ، بسبب ارتفاع درجة حرارتها ، الناشىء عن المفقودات ، كما سبق شرحه . ويكون الحمل النوعى المغناطيسى عبارة عن كثافة الفيض المغناطيسى فى القلب الحديدى للمحول، الذى يتحدد على أساسه مساحة الحديد فى مقطع هذا القلب ، وهى أول الأبعاد الرئيسية المطلوبة . أما الحمل النوعى الكهربائى ، فهوعبارة عن مقدارالامبير لفات (أوالأمبيرموصلات) لكل سنتيمتر من طول الساق ، الذى توضع عليه اللفات . ويحدد طول الساق ، فى هذه الحالة ، ارتفاع النافذة (window) ، التى تحتوى على الملفات ، بحيث يمكن تحديد عرض النافذة ، ونكون بذلك قد حصلنا على الأبعاد الرئيسية الثلاثة للمحول ، وهى مساحة القلب الحديدى ، وبعدا النافذة .

يتوقف مدى التوفيق فى اختيار القيم المناسبة ، لكل من الحمل النوعى الكهربائى

والحمل النوعى المغناطيسى ، للحصول على أحسن وأرخص محول ، على مقدار الخبرة السابقة ، المكتسبة من خلال ممارسة صناعة المحولات ، تماما كما هو الحال بالنسبة لتصميم أى نوع من أنواع الآلات الكهربية الأخرى ، التى سبقت دراستها .

سوف ندرس بعض العوامل ، التى تتأثر بالحمل النوعى المغناطيسى ، أو الحمل النوعى الكهربائى ، وذلك حتى يمكن استنباط قيم الأبعاد الرئيسية للمحول بدلالة هذه العوامل . كما أننا سوف نجد ، على هذا الأساس ، أن الحمل النوعى الكهربائى لايظهر فى المعادلات بشكله الذى تم تعريفه ، وإنما من خلال العوامل التى تتأثر به .

١ — مفقودات الحديد :

يتكون حديد المحول (الساق والفك leg and yoke) من رقائق ، يكون سمكها عادة 0.35 مم أو 0.5 مم ، ويفصل بينها طبقة رقيقة من مادة عازلة ، لكى لا تتعدى مفقودات التيار الإعصارية حدا معينا ، كما سبق شرحه فى مناسبات عديدة . ويتم حساب مفقودات الحديد فى المحول عادة على أساس المفقودات النوعية لكل كيلوجرام من وزن الرقائق ، التى نحصل عليها من المصنع المنتج للرقائق . إذ يقوم المصنع باختبار هذه الرقائق ، فى آخر مراحل انتاجها ، وذلك لتحديد قيمة مفقودات الحديد (التخلف والتيارات الإعصارية معا) لكل كيلو جرام من وزن الرقائق ، عندما تكون قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية 10 كيلو جاوس ، والتردد 50 ذبذبة فى الثانية . ويرمز لهذه القيمة بالرمز V_{10} ، كما يمكن حساب المفقودات النوعية لنفس هذه الرقائق ، التى يرمز لها بالرمز p_{Fe} ، عندما تكون قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية ، فى

القلب الحديدى الذى تصنع منه ، B جاوس ، والتردد f ذبذبة/ثانية ، من العلاقة الآتية :

$$p_{Fe} = V_{10} \times \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \times \left(\frac{f}{50} \right) W/Kg \quad (١٠ — ١)$$

فاذا كان وزن الرقائق المستخدمة فى حديد المحول G_{Fe} كيلو جرام ، وكان K_b معامل تجريبى (قيمته حوالى 1.1) ، نستخدمه لكى نأخذ فى الحساب الزيادة الناشئة عن تجميع الرقائق ، فى قيمة المفقودات ، تكون المفقودات الحديدية فى المحول P_{Fe} بالوات عبارة عن :

$$P_{Fe} = p_{Fe} \times G_{Fe} \times k_b$$

$$= V_{10} \times \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \times \left(\frac{f}{50} \right) \times G_{Fe} \times K_b \quad \ldots\ldots \quad (١٠ — ٢)$$

ونظرا لأننا نستخدم نفس قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط المغناطيسية فى الساق والفك معا ، لكى نحصل على أقل قيمة ممكنة للمفقودات من هذه الناحية ، فان المعادلة (٢ — ١٠) تستخدم للحصول على مفقودات الحديد الكلية فى المحول ، باعتبار أن G_{Fe} عبارة عن وزن الرقائق المستخدمة فى السيقان والفكوك جميعها .

٢ — مفقودات النحاس (او الالومنيوم) ، اى مفقودات مربع التيار :

يستخدم النحاس أو الألومونيوم ، على حسب الظروف ، فى صنع الأسلاك التى تتكون منها ملفات المحول . ويمكن تحديد قيمة للمفقودات النوعيه ، فى هذه الحالة ، يتحدد على أساسها وزن النحاس أو الألومونيوم ، الذى يستخدم فى المحول ، فيتم مقارنته بوزن الحديد ، ويكون لذلك أثره المطلوب فى منهاج التصميم . ويكون تحديد قيمة المفقودات النوعية للنحاس أو الألومونيوم p_{cu} بدلالة كثافة

التيار فى الموصلات ، التى تؤثر بطريق غير مباشر على الحمل النوعى الكهربائى للمحول ، على النحو التالى : نفرض أن وزن النحاس المستخدم فى الملفين الابتدائى والثانوى هو G_{cu} كيلوجرام ، و m هو عدد السيقان ، و I التيار لكل ساق ، و l_m متوسط طول اللفة حول الساق بالأمتار ، و a مساحة مقطع الأسلاك فى الملفات ، حيث تكون j كثافة التيار بالأمبير لكل ملليمتر مربع . فاذا كانت درجة الحرارة القصوى ، التى تصل اليها الملفات هى 90 درجة مئوية ، فان المقـــاومة النوعية للنحاس عند هذه الدرجة هى $\rho_{cu} = 0.022$ أوم مم٢/متر ، كما أن المقاومة النوعيه للالومونيوم عند نفس الدرجة هى $\rho_{al} = 0.029$ أوم مم٢/متر . وباعتبار أن الوزن النوعى للنحاس $\gamma_{cu} = 8.9$ جم/سم٣ نجد أن :

$$p_{cu} = \frac{m\, I^2 \times \rho_{cu} \frac{l_m\, T}{a}\, K_{ad}}{m \times a \times l_m \times T \times \gamma_{cu} \times 10^{-3}} = \frac{K_{ad}\, \rho_{cu}\, j^2}{\gamma_{cu} \times 10^{-2}} \ \ W/Kg$$

$$p_{al} = \frac{K_{ad}\, \rho_{al}\, j^2}{\gamma_{al} \times 10^{-2}} \ \ W/Kg \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٣ — ١٠)$$

حيث K_{ad} معامل يأخذ فى الإعتبار زيادة المفقودات ، نتيجة لعوامل مختلفة لايمكن حصرها حسابيا . وتتحدد قيمة هذا المعامل تجريبيا ، بناء على ذلك ، بحوالى 1.1 . فاذا عوضنا ، علاوة على ذلك ، فى المعادلة (٣ — ١٠) بالقيم الخاصة بكل من النحاس والألومونيوم ، نحصل على مفقودات مربع التيار النوعية ، لكل منهما بدلالة كثافة التيار ، على النحو التالى :

$$p_{cu} \cong 2.7\, j^2 \ \ W/Kg \quad , \quad p_{al} \cong 11.8 \ \ W/Kg \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٤ — ١٠)$$

ويلاحظ أننا اعتمدنا ، فى استنباط المعادله (٣ — ١٠) ، على أن الأمبير لفات متساوية فى كل من الملف الإبتدائى والملف الثانوى ، وهذا صحيح . كما

أننا اعتبرنا أن كثافة التيار واحدة فيهما ، وهو ما يراعى فعلا فى تصميم المحولات ، لأن تساوى كثافة التيار فى الملفين يؤدى إلى اعطاء أقل قيمة ممكنة لمفقودات مربع التيار فيهما ، وهو ما يمكن اثباته بالحساب بطريقة سهلة .

إذا كانت P_{cu} هى مفقودات النحاس الكلية فى المحول ، فمن الواضح أن :

$$P_{cu} = p_{cu} \times G_{cu} \quad , \quad P_{al} = p_{al} \times G_{al} \quad \cdots \quad \cdots \quad (٥—١٠)$$

٣ — النسبة بين مفقودات الحديد ومفقودات النحاس :

ويرمز لها عادة بالرمز β ، وهى تختلف على حسب ماذا كان المحول للقدرة أو للتوزيع ، كما سبق شرحه فى الباب السابع (ص ٣٦٤ ، ٣٦٥) . وفيما يلى حدود β بالنسبة لنوعى المحولات :

فى حالة محولات التوزيع تكون قيمة β من 0.15 إلى 0.5

فى حالة محولات القدرة تكون قيمة β من 0.5 إلى 0.9 .

كذلك تتحدد قيمة النسبة α بين وزن الحديد ووزن النحاس تجريبيا ، بناء على ذلك ، كما يأتى :

$$\alpha = \frac{G_{Fe}}{G_{cu}} \simeq 2 — 4$$

٤ — معامل الجودة والمفقودات النوعية :

سبق أن بينا فى الباب السابع (ص ٣٦٣ ، ٣٦٤) ، أن قيمة معامل الجودة ، عند الحمل الكامل ، تتوقف على قيمة النسبة β كما أن تناول هذه الظاهرة من ناحية أخرى يعنى أننا قد نحصل على قيمة النهاية العظمى لمعامل الجودة عند الحمل الذى تصبح فيه مفقودات النحاس ، لهذا الحمل ، مساويه لمفقودات الحديد الثابتة

القيمة تقريبا (المعادلة ١٣ — ٧ ص ٣٦٤) . وقد أوضحنا ، فى نفس الوقت ، تأثير ذلك على تحديد قيمة النسبة β ، فى كل من نوعى محولات القدرة ومحولات التوزيع ، على حسب طبيعة تشغيل كل منهما . فاذا تحددت قيمة قدرة المخرج المحول P_2 كيلووات (كما يطلبها الزبون) ، وأمكن تحديد قيمة لمعامل الجودة η (تجريبيا على حسب الخبرة السابقة) ، فانه يمكن الربط بينهما ، وبين المفقودات الكلية للمحول P_v ، وجميع العوامل السابقة ، على النحو التالى :

$$P_v = \frac{P_2}{\eta}(1-\eta) = P_{cu} + P_{Fe} = P_{cu}(1+\beta)$$

$$P_{cu} = \frac{P_2}{\eta}\cdot\frac{1-\eta}{1+\beta} \quad , \quad P_{Fe} = \frac{P_2}{\eta}\cdot\frac{1-\eta}{1+\beta}\cdot\beta \quad \ldots (١٠-٦)$$

$$G_{cu} = \frac{P_{cu}}{p_{cu}} \quad , \quad G_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{p_{Fe}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (١٠-٧)$$

يمكننا الآن ، بناء على ماسبق كله ، تحديد قيمة للمفقودات النوعية p_v ، وهى عبارة عن قيمة المفقودات الكلية بالوات لكل كيلوجرام من مجموع وزنى النحاس والحديد فى المحول ، على النحو الآتى :

$$p_v = \frac{P_{cu} + P_{Fe}}{G_{cu} + G_{Fe}} = \frac{P_{cu}(1+\beta)}{G_{cu}(1+\alpha)} = p_{cu}\frac{(1+\beta)}{(1+\alpha)} \quad (١٠-٨)$$

كما يمكننا ، من الناحية التجريبية ، وضع الحدود الآتية لقيمة p_v :

فى المحولات ثلاثية المراحل تكون قيمة p_v من 6 إلى 10 وات/كجم

فى المحولات مفردة المرحلة تكون قيمة p_v من 4 إلى 7 وات/كجم

مساحة مقطع الحديد فى القلب أو الساق :

إن تحديد قيمة مناسبة لمساحة مقطع الحديد فى القلب أو الساق يتوقف على قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط B فى هذا القلب . ويمكن أن يتم ذلك ببساطة على أساس قيمة تجريبية معينة ، للضغط على كل لفة E_t (Voltage per turn) ، كما يأتى :

$$E = 4.44 f T \phi \times 10^{-8} = 4.44 f T B A_{Fe} \times 10^{-8} V$$

$$E_t = \frac{E}{T} = 4.44 f B A_{Fe} \text{ volts/turn} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (٩—١٠)$$

ويمكن أن تتحدد القيمة التجريبية لـ E_t من الجدول الآتى ، على حسب نوع المحول ، وقدرة المخرج KVA بالكيلوفولت أمبير ، عند 50 ذبذبة فى الثانية :

K.V.A. 50c/s	المحول ذو القلب		المحول الهيكلى	
	مفرد المرحله	ثلاثى المراحل	مفرد المرحلة	ثلاثى المراحل
100	5	3.3	11	7
500	11	7.5	25	14
1000	15	10	30	20
3000	35	25	60	35
10000	60	50	100	60
20000	85	70	140	80
30000	—	85	—	100

كذلك يمكن تحديد مساحة مقطع الحديد فى القلب أو الساق ، على أساس قيم معينه ، لجميع العوامل المؤثرة ، التى سبق عرضها ، وذلك بعد أن نحصل على المعادلة ، التى تربط بين قيمة هذه المساحة ، وتلك العوامل ، كما يأتى :

$$KVA = 4.44\, f\, T\, B\, A_{Fe} \times aj \times 10^{-11}$$

كيلو فولت أمبير :

$$= C_1\, f\, T\, B\, A_{Fe} \times aj \quad \ldots\ldots\ldots \text{(١٠—١٠)}$$

كيلو جرام :

$$G_{Fe} = A_{Fe}\, l_{Fe}\, \gamma_{Fe} \times 10^{-3}$$

حيث l_{Fe} هو طول الحديد فى السيقان والفكوك جميعها ، باعتبار أن مساحة مقطع الساق تساوى مساحة مقطع الفك ، وهى A_{Fe} ، لكى نحصل على أقل قيمة ممكنة لمفقودات الحديد فى السيقان والفكوك معا ، كما سبق ذكره .

كيلو جرام :

$$G_{cu} = 2\, T\, a\, l_m\, \gamma_{cu} \times 10^{-3}$$

$$\frac{G_{Fe}}{G_{cu}} = \frac{P_{Fe}}{p_{Fe}} \times \frac{p_{cu}}{P_{cu}}$$

$$\frac{G_{Fe}}{G_{cu}} = \beta\, \frac{p_{cu}}{p_{Fe}} = \frac{A_{Fe}}{Ta} \times \frac{l_{Fe} \times \gamma_{Fe}}{2\, l_m \times \gamma_{cu}}$$

يمكننا اعتبار قيمة النسبة بين l_{Fe} و l_m ثابتة لنفس المحول ، فنجد أن المعادلة السابقة تعطينا العلاقة الآتية :

$$Ta = C_2\, \frac{p_{Fe}}{p_{cu}} \times \frac{A_{Fe}}{\beta_2} \quad (C_2 \text{ ثابت معلوم})$$

$$\therefore \quad KVA = C_1 C_2 \cdot \frac{A^2_{Fe} f B j \times 10^{-11}}{\beta \cdot \frac{p_{cu}}{p_{Fe}}}$$

$$\therefore \quad A_{Fe} = C \sqrt{\frac{KVA \times \beta \times (p_{cu}/p_{Fe}) \times 10^5}{f \times B \times j}} \text{ سم}^2 \quad (١١ — ١٠)$$

تتحدد قيمة تجريبية للثابت C ، على حسب نوع المحـــول ، وطريقة تنفيذ ملفاته ، من الجدول الآتى :

نوع المحول والملفات	مفرد المرحلة	ثلاثى المراحل
قلب حديدى ملفات دائرية المقطع	43 — 47	34 — 37
قلب حديدي ملفات مستطيلة المقطع	53 — 60	42 — 47
هيكلى	82 — 92	55 — 61

وفى حالة المحـولات ، التى تستخدم فيهـا ملفـات من الالومونيوم ، تكون قيمة C حوالى 60 % من القيمة المناظرة فى الجدول السابق .

يمكن تحديد القيم التى يسمح باستخدامها لكل من B و j ، على حسب نوع الرقائق المستعملة ، وطريقة التبريد ، من الجدولين الآتيين :

B بالجاوس

نوع المحول	الرقائق العادية	رقائق مخصوصة من السبائك
محول توزيع	5500 — 7500	11000 — 14000
محول قدرة	10000 — 13000	تصل إلى 15000

j بالأمبير لكل ملليمتر مربع

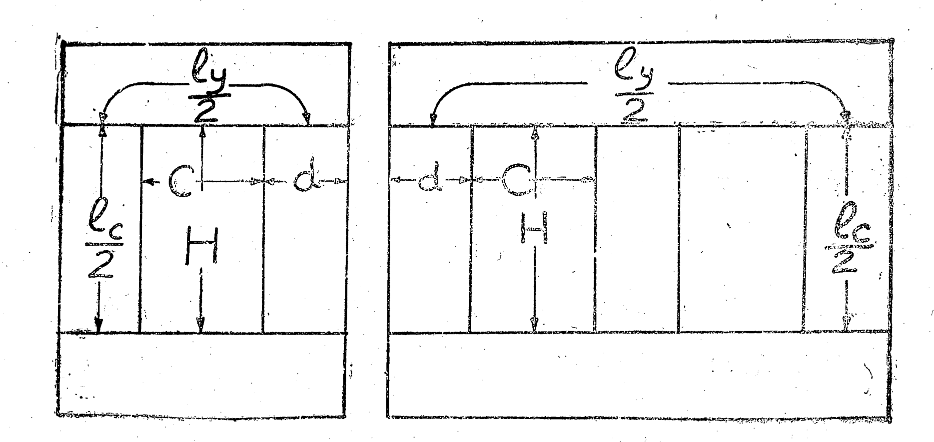
نوع التبريد	ملفات النحاس	ملفات الألومونيوم
ذاتي بالهواء	1.3 — 1.8	1.0 — 1.4
صناعي بالهواء	2.0 — 3.5	1.5 — 1.8
بالمـــاء	2.5 — 4.0	1.9 — 2.3

يجب ، بعد حساب مساحة مقطع الحديد فى الساق ، باستخدام المعـــادلة (١١ــ١٠) ، المراجعة على قيمة E_t ، باستخدام المعادلة (٩ــ١٠) ، بحيث تقع فى الحدود المبينة فى الجدول المعطى . كما يتعين علينا ، بعد ذلك، تحديد شكل المقطع بواحد من الأشكال المعطاة فى شكل (٤ــ٧ أ) ، ص ٣٣٣ ، ثم تعيين قيمة قطر الدائرة المحيطة d ، بناء على ذلك . هذا ويكون المقطع عـــلى شكل صليب، فى المحولات الصغـيرة ومتوسطة الحجم ، حيث تتوافر قنوات تبريد ، كافية الحجم ، بين الحديد والملفات . ونحصل ، فى هذه الحالة ، على أكبر مساحة يستفاد بها من الدائرة المحيطيـة ، عندما يكون عرض الدرجـة الأولى للصليب 0.526 d ، وعرض الدرجـة الثـانية 0.851 d . فاذا كان سمك الرقائق 0.35 ملليمتر ومعامل الحديد $k_i = 0.86$ (نسبة مساحة الحديد الصافى إلى مساحة المقطع A_{Fe}) ، يمكننا أن نعتبر أن نسبة مساحة الحديد الصافى إلى مساحة الدائرة المحيطية حوالى 0.67 . وترتفع قيمة هذه النسبة إلى 0.708 عندما يكون سمك الرقائق 0.5 مم . وعندما يكون القلب الحـديدى مقسما عـلى ثلاث درجات ، ومكونا من خمسة مقاطع (5 packets) ، كما هو مبين فى شكل (٤ــ٧ب،ح)

على اليمين ، نجد أن عرض الدرجة الأولى يكون 0.42d ، وعرض الثانية 0.7 d وعرض الثالثة 0.9 d ، بينما تكون نسبة مساحة الحديد الصافى إلى مســـاحة الدائرة المحيطيـة حـوالى 0.73 ، عندما يكون سمـك الرقائق 0.35 مم ، و 0.76 عندما يكون سمك الرقائق 0.5 مم . أما إذا كان القلب الحديدى على أربع درجات أى أن القلب مكون من أربعة مقاطع ، كما هو مبين فى شكل (٤ـــ٧ أ) على اليمين ، يكون عرض الدرجة الأولى 0.36d ، وعرض الثانية 0.6 d ، وعرض الثالثة 0.78d ، وعرض الرابعـة 0.93d . وفى هذه الحـالة تكون نسبة مســاحة الحديد الصافى إلى مساحة الدائرة المحيطية حوالى 0.76 ، عندما يكون سمك الرقائق 0.35 مم ، وحوالى 0.79 عندما يكون سمك الرقائق 0.5 مم .

ابعاد النافذة : (Window dimensions)

يجب أن يتحدد عرض النافذة C ، وارتفاعها H ، شكل (١ ــ ١٠) ، بحيث يمكن أن تستوعب الملفات وملحقاتها . ويمكن أن يتم ذلك باحدى الطريقتين الآتيتين :



شكل (١ ـــ ١٠)

١ — باستخدام قيمة تجريبية لعامل فراغ النافذة :

(Window space factor)

يعرف معامل فراغ النافذة k_w بأنه عبارة عن النسبة بين مساحة النحاس (أو الألومونيوم) الصافى الموجود فى النافذة إلى مساحة فراغ النافذة $H \times C$.
وتتوقف قيمة k_w على كل من قيمة الضغط العالى للمحول ، الذى يتحدد على أساسه سمك العازل على الموصلات ، وقيمة التيار ، أو مقنن القدرة ، الذى تتحدد على أساسه مساحة مقاطع الموصلات ، كما يتضح من الجدول الآتى :

مقنن القدرة KVA	k_w عند الضغوط المختلفة 3 KV	10 KV	30 KV	100 KV
100	0.28	0.20	0.14	—
800	0.37	0.27	0.20	0.15
2000	0.40	0.31	0.23	0.16
10000	0.45	0.37	0.28	0.21

نبدأ فى هذه الحالة بتحديد قيمة معينة لـ k_w ، من الجدول السابق ، أو على أساس تجريبى آخر ، وذلك على حسب مقنن قدرة المحول ، وضغطه العالى .
نحسب بعد ذلك مساحة مقطع الملف الإبتدائى a_1 مم٢ ، ومساحة مقطع الملف الثانوى a_2 مم٢ ، بمعلومية كثافة التيار δ ، فى كل منهما ، والتيارين I_1 ، I_2 .
بذلك يمكننا أن نحصل على مساحة النافذة ، أو حاصل الضرب $H \times C$ من العلاقة الآتية :

$$C \times H = \frac{a_1 T_1 + a_2 T_2}{k_w} \rightarrow$$ المحول مفرد المرحلة ... (١٢ — ١٠)

$$C \times H = \frac{2(a_1 T_1 + a_2 T_2)}{k_w} \rightarrow$$ المحول ثلاثى المراحل ... (١٣ — ١٠)

هذا ، ويمكننا ، من الناحية التجريبية أيضا ، تحديد النسبة بين H و C بالقيمة من 2 إلى 4 ، مما يجعلنا نحصل على كل منها على حدة .

تكون المراجعة على قيمتى C , H من خلال ترتيب الملفات بملحقاتها (العازل عليها ، وقنوات التبريد ، والفواصل الخشبية ، واسطوانات الميكانيت ... ألخ)، والتأكد من كفاية الفراغ المتاح ، على النحو المطلوب ، بحيث يتم فى خلال ذلك تعديل القيمتين ، حتى يفيا بالغرض بالضبط . نجد أن كلا من طول الساق ، وطول الفك ، يتحدد تلقائيا ، بعد ذلك .

٣ — بتحديد طول حديد السيقان l_c ، وطول حديد الفكوك l_y :

(Determination of the length of cores and length of yokes)

إن تحديد قيمة مفقودات الحديد الكلية P_{Fe} ، ومفقوداته النوعية p_{Fe} ، والاستفادة بها فى خطوط التصميم السابقة ، ثم تحديد وزن الحديد G_{Fe} كيلوجرام بناء على ذلك ، يجعلنا قادرين على تحديد بعدى النافذة C , H ، على أساس الاحتياجات الفعلية للمحول ، وذلك بعد أن ارتبطت العوامل كلها فى معادلة واحدة لتحديد مساحة مقطع حديد المحول ، التى نأخذها أساسا لنا فى حسابات النافذه . فاذا فرضنا أن حجم الحديد الكلى ، فى السيقان والفكوك معا ، هو $v_{Fe} = \frac{G_{Fe} \times 10^3}{\gamma_{Fe}}$ بالسنتيمترات المكعبة ، وأنه بناء على الخبرة المكتسبة فى صناعة المحولات ، يمكننا أن نعتبر أن طول الحديد فى الفكوك l_y

يساوى طول الحديد فى السيقان l_c ، بحيث يساوى كل منهما نصف طول الحديد الكلى l_{Fe} ، على أساس مساحة مقطع واحدة للسيقان والفكوك معا A_{Fe} ، التى سبق تحديدها ، نجد أن :

$$v_{Fe} = \frac{G_{Fe} \times 10^3}{\gamma_{Fe}} = A_{Fe} \times l_{Fe} = 2\, A_{Fe}\, l_y = 2\, A_{Fe}\, l_c$$

$$\therefore \quad l_c = l_y = \frac{l_{Fe}}{2} = \frac{v_{Fe}}{2A_{Fe}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (١٠—١٤)$$

بالرجوع إلى شكل (١ — ١٠) يمكننا أن نستنتج أنه ، بالنسبة للمحول مفرد المرحلة ، يكون .

$$H = \frac{l_c}{2} = \frac{l_{Fe}}{4}$$

$$\frac{l_y}{2} = \left(C + \frac{\pi d}{2} \right) = \frac{l_{Fe}}{4} \qquad ,$$

$$C = \frac{l_{Fe}}{4} - \frac{\pi\, d}{2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (١٠—١٥)$$

أما بالنسبة للمحول ثلاثى المراحل ، فنجد أن :

$$H = \frac{l_c}{3} = \frac{l_{Fe}}{6}$$

$$\frac{l_y}{2} = \left(2\,C + d + \frac{\pi d}{2} \right) = \frac{l_{Fe}}{4}$$

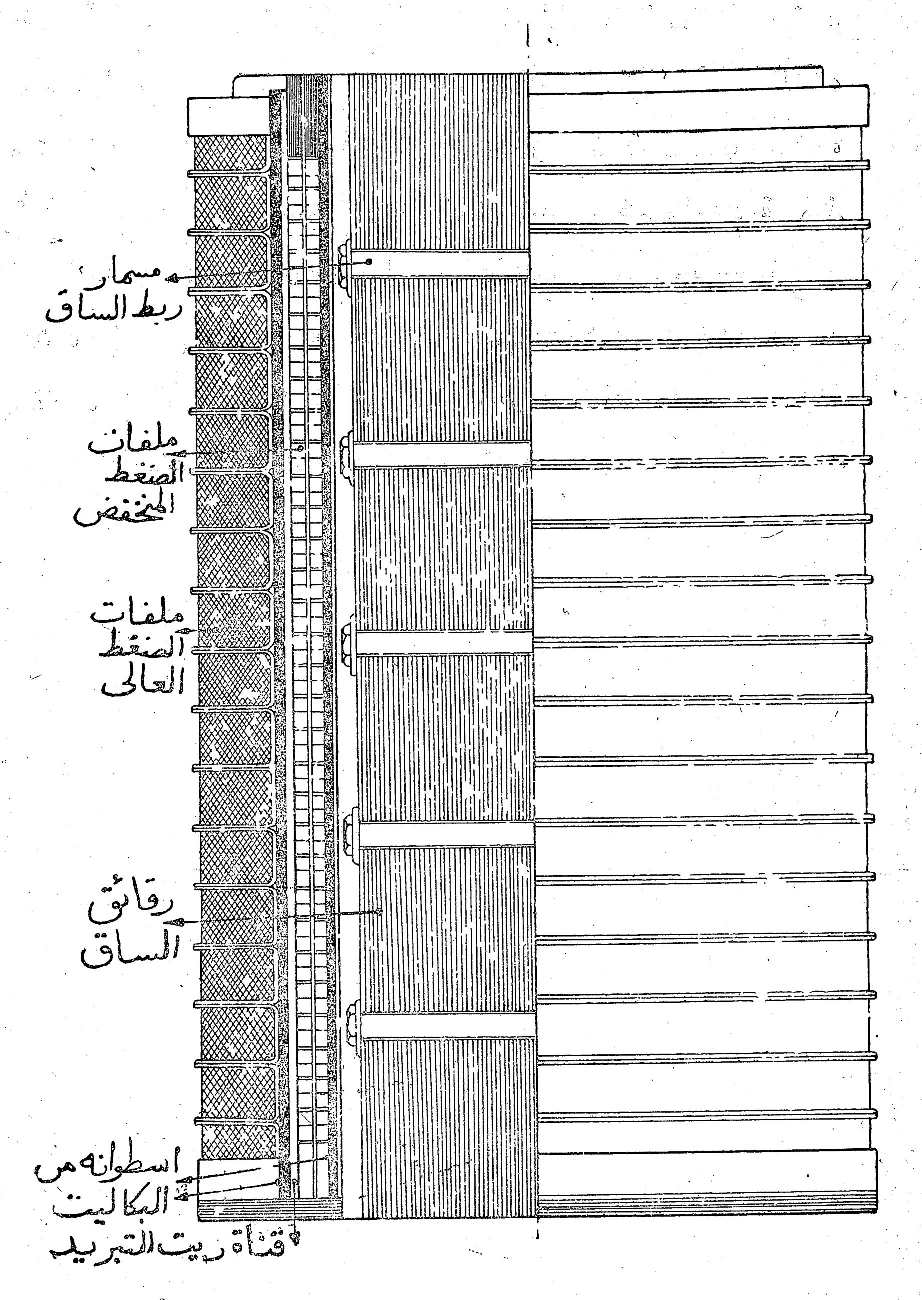
$$\therefore \quad C = \frac{l_{Fe}}{8} - 1.3\, d \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (١٠—١٦)$$

وعندما نحصل على قيمتى H , C بهذه الطريقة ، يجب المراجعة عليهما ، من

ناحية وقوع قيمة النسبة بينهما بين 2 و 4 كما جاء فى 1 سابقا ، ثم من ناحية وقوع قيمة k_w فى الحدود التجريبية المعروفة . كذلك يجب أن تستوعب النافذة ، فى هذه الحالة ، الملفات على النحو الذى سبق ذكره فى 1 .

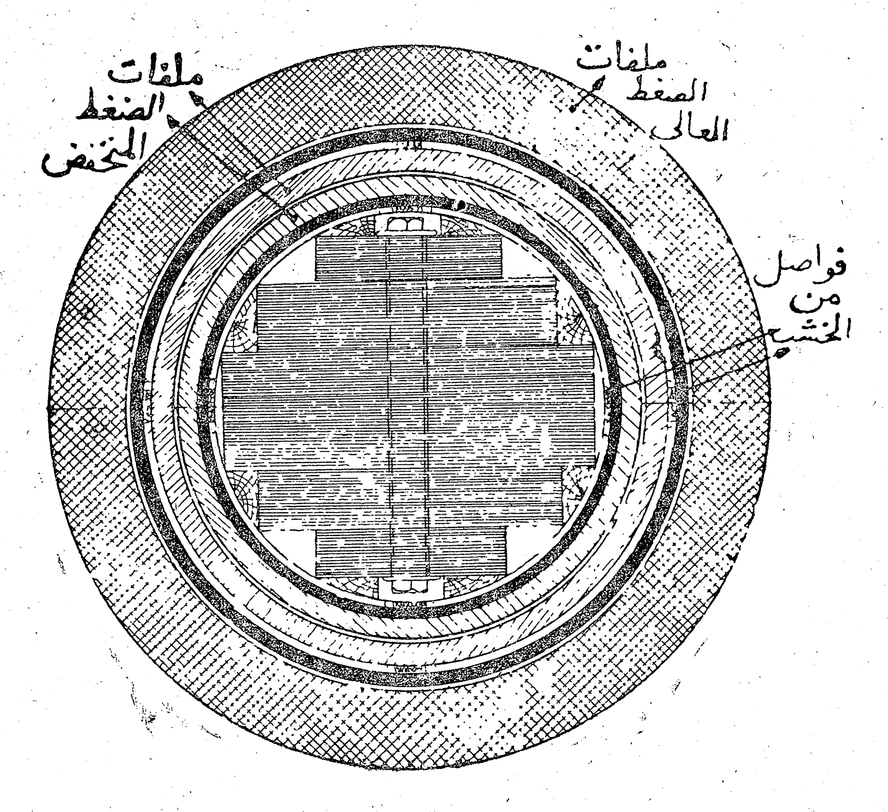
ترتيب الملفات فى النافذة : (arrangement of the coils)

تكون الملفات دائرية (circular) ، أو مستطيلة (rectangular) ، على حسب ما إذا كان القلب الحديدى مدرجا ، أو مستطيل المقطع ، على الترتيب . كما أن الملفات قد تكون متمركزة (concentric) ، كما هو الحال فى الملفات الاسطوانية (cylindrical coils) ، أو متداخلة (sandwiched) ، كما هو الحال فى الملفات القرصية (Disc coils) ، التى تستخدم غالبا فى المحولات الهيكلية ، ويمكن معها التحكم بسهولة فى الممانعة المكافئة للملفات . والملفات الاسطوانية قد تكون محورية بسيطة (simple coaxial) ، حيث يكون الملف الابتدائى عبارة عن اسطوانة واحدة ، وكذلك الملف الثانوى ، كما أنها قد تكون محورية مزدوجة (double coaxial) ، حيث يتكون كل ملف من اسطوانتين يتناوب وضعهما على القلب الحديدى ، وحيث يقع ملف ضغط عالى بين ملفى ضغط منخفض ، على أن يأتى ملف الضغط المنخفض أولا على القلب ، بسبب دواعى العزال ، وذلك فى المحولات ذات القلب الحديدى . هذا ، ويمكن عن طريق تقسيم الملفات على هذا النحو التحكم فى الممانعة المكافئة للمحول . أما فى حالة المحول الهيكلى ، فان سهولة عزل الملفات تقتضى أن يكون وضع ملف الضغط المنخفض من الخارج . هذا ، وتخدم الفراغات التى تترك بين الملفات ، بقصد عزلها عن بعضها البعض ، عند امتلائها بالزيت ، أغراض التبريد ، باستخدام


مسمار
ربط الساق
ملفات
الضغط
المنخفض
ملفات
الضغط
العالى
رقائق
الساق
اسطوانه من
البكاليت
قناة زيت التبريد

شكل (٢ — ١٠)

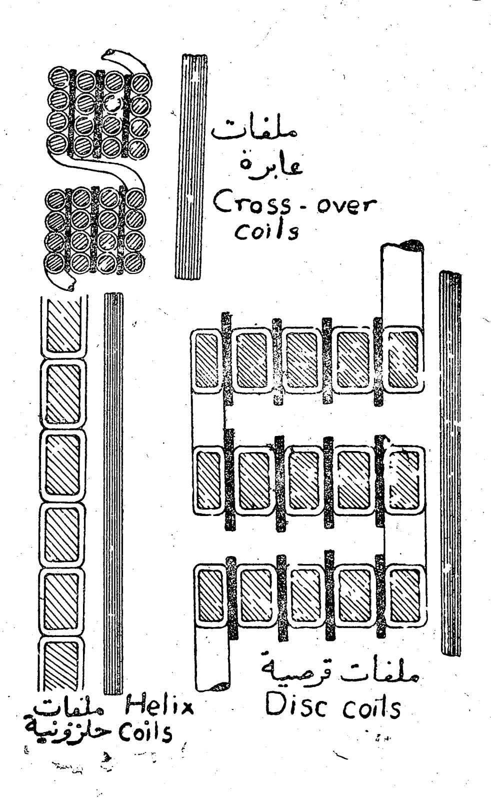
الزيت أيضا ، شكل (٢ — ١٠) . يتكون ملف الضغط العالى الاسطوانى عادة من عدة أقسام ، يلف كل قسم منها على بكرة من المادة العازلة (بكاليت مثلا) ، ويتكون من عدد محدود من اللفات ، التى لايتجاوز الضغط عليها 1000 فولت ، شكل (٢ — ١٠) . وإذا أمكن عمل ملف الضغط العالى من قسم واحد ، فقد يصل الضغط عليه إلى 5000 أو 6000 فولت . ونحن نلجأ إلى تقسيم ملف الضغط العالى عادة ، لكى يسهل تداوله ، حين يصبح من الصعب التعامل مع هذا العدد الكبير من اللفات ، التى تحتوى على كمية كبيرة من النحاس ، على دفعة واحدة . ويراعى أن تكون الملفات صلبة متماسكة بشدة ، حتى لاتتأثر بالقوى الكبيرة ، عند حدوث



شكل (٣ — ١٠)

دائرة قصر . كما يفصل بين البكرات ، فى المحولات الكبيرة ، فواصل من المادة العازلة ، لكى يمكن مرور زيت التبريد بينها (غير مبينة فى شكل (٢ — ١٠)) ، مما يزيد من فاعلية التبريد .

يبين شكل (٣ — ١٠) مقطعا للملفات المبينة فى شكل (٢ — ١٠) ، ويبين شكل (٤ — ١٠) الأنواع المختلفة للملفات .



شكل (٤ — ١٠)

يفضل باستمرار استخدام الملفات الحلزونية ، من طبقة أو طبقتين .

ويتيسر ذلك عادة بالنسبة لملفات الضغط المنخفض ، التى يتم لفها ، فى

معظم الأحيان ، على هذا النحو . أما بالنسبة لملفات الضغط العالى ، فاننا نلجأ إلى استخدام هذا النوع من الملفات ، كلما أمكن ذلك .

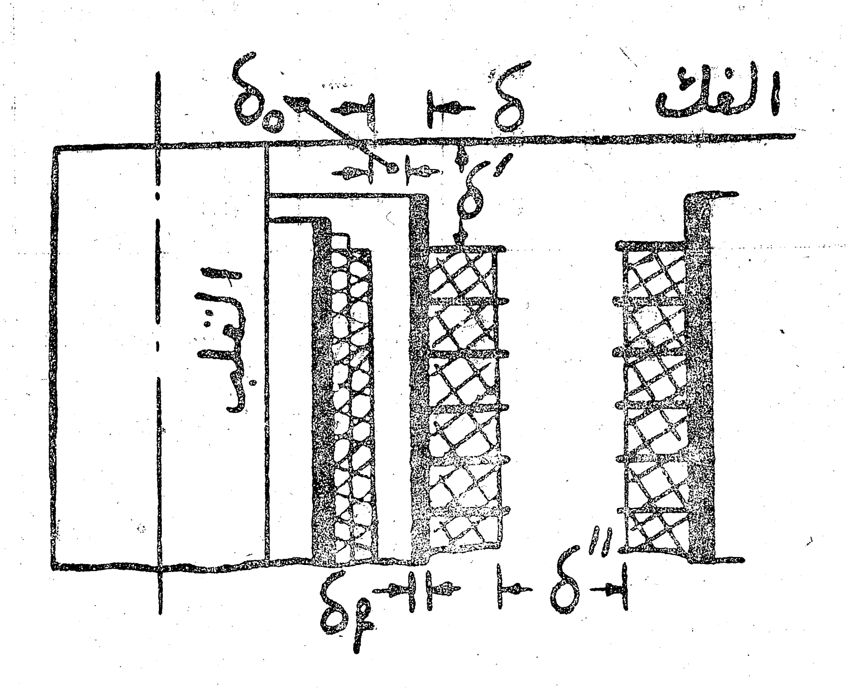
عزل الملفات : (Insulation of the coils)

تستخدم اسطوانات (جوفاء) من البكاليت (bakelite paper cylinders) لعزل ملف الضغط المنخفض عن القلب الحديدى* ، ثم عزل ملف الضغط المنخفض عن ملف الضغط العالى . وبينما يكون أى من الملفين مرتكزاً على الاسطوانة العازلة كما هو واضح فى شكل (٢ — ١٠) ، فقد يكون الغرض من وجود الاسطوانة العازلة فقط ، فى بعض الأحيان ، عمل الفاصل اللازم لتحديد قناة التبريد ، التى يمر فيها الزيت لتبريد الملفات . ويكون عزل الملفات عن الفلك ، فوقها وتحتها ، باستخدام حلقات من البكاليت ، ترص فوق بعضها البعض ، على حسب المسافة الموجودة ، وكذلك باستخدام فواصل من الخشب . كما تستخدم فواصل من الخشب أيضا بين اسطوانات البكاليت العازلة والقلب الحديدى ، أو الملفات ، كما هو مبين فى شكل (٣ — ١٠) . هذا ، وتتوقف قيمة المسافة δ' ، التى يجب تركها على الأقل بين حافة ملفات الضغط العالى وحديد الفلك أو أقرب حديد اليها . من أعلى ومن أسفل ، على ضغط هذه الملفات . كذلك تتوقف على هـذا الضغط كل من المسافة δ بين السطح الداخلى لملفات الضغط العالى ، والسطح الخارجى لملف الضغط المنخفض ، والمسافة δ'' بين السطحين الخارجيين لملفى الضغط العالى ، فى نفس النافذة ، أو بين السطح الخارجى لملف الضغط العالى ،

---

* لاحظ أننا نركز دائما على المحول ذى القلب ، لأن هذا هو النوع المتداول عندنا . بينما نشير فقط إلى المحول الهيكلى ، لأن استخدامه نادر فى بلادنا .

وسطح الصهريج القريب منها (على أساس وجـــــود الزيت فى الفراغات كلهـا) ، وسمك اسطوانة البكاليت δ_f ، التى ترتكز عليهـا ملفات الضغط العالى ، وعرض قناة الزيت δ_0 بين ملفى الضغط المنخفض ،



شكل (٥ — ١٠)

والضغط العالى . يبين شكل (٥ — ١٠) هذه المسافات ، كما يعطى الجدول الآتى : قيم كل من δ_f و δ و δ_0 مع القيم القياسية المختلفة لضغط ملف الضغط العالى V_1 حتى 20 كيلو فولت .

بالنسبة للضغوط أقل من 6 كيلو فولت تستخدم القيم المعطاة عند 6 KV ، أما بالنسبة للضغوط ، التى تكون أعلى من 20KV ، فتستخدم القيم المعطاة عند 20KV لكل من δ_f و δ_0 . أما δ فيراعى ، فى هذه الحالة ، أن يكون :

δ/V_1	المسافات بالسنتيمتر			V_1 KV
	δ_o	δ	δ_f	
0.100	0.4	0.6	0.2	6
0.080	0.6	0.8	0.2	10
0.067	0.7	1.0	0.3	15
0.060	0.9	1.2	0.3	20

$$0.06 \frac{cm}{KV} \lesssim \frac{\delta}{V_1} \lesssim 0.07 \frac{cm}{KV} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (١٠ — ١٧)$$

أما بالنسبة للمسافة δ' فتكون على أساس أن :

$$2 \lesssim \frac{\delta'}{\delta} \lesssim 2.5 \quad \ldots\ldots \quad (١٠ — ١٨)$$

وبالنسبة للمسافة δ'' يجب أن يكون :

$$\delta' \gtrsim 2\ 5\ \delta \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (١٠ — ١٩)$$

وذلك على أساس عدم وجود أى فواصل من مادة عازلة بين السطحين ، اللذين يفصل بينهما المسافة δ'' ، وإلا فانه يمكن تصغير قيمة δ'' إلى درجة أن تصبح مساوية لـ $1.5\ \delta$ تقريبا .

ويكون تحديد هذه المسافات جميعها ؛ فى حدود الأرقام المعطاة ، على أساس صمود المواد العازلة ، وتحملها للمجالات الكهربية الناشئة عن الضغط العالى . ولكننا قد نحتاج ، فى بعض الأحيان ، إلى تعديل قيمة δ ، بعيداً عن هذه الحدود ،

لتغيير قيمة المانعة المكافئة ، لكي نحصل على قيمة معينة لضغط القصر (short circuit voltage) ، الذى يحدد تيار القصر المحول ، كما سوف يتبين لنا فيما بعد . كذلك قد نحتاج إلى تعديل قيمة δ ، بغرض تحديد عرض معين لقنـــاة التبريد ، فى أحوال خاصة .

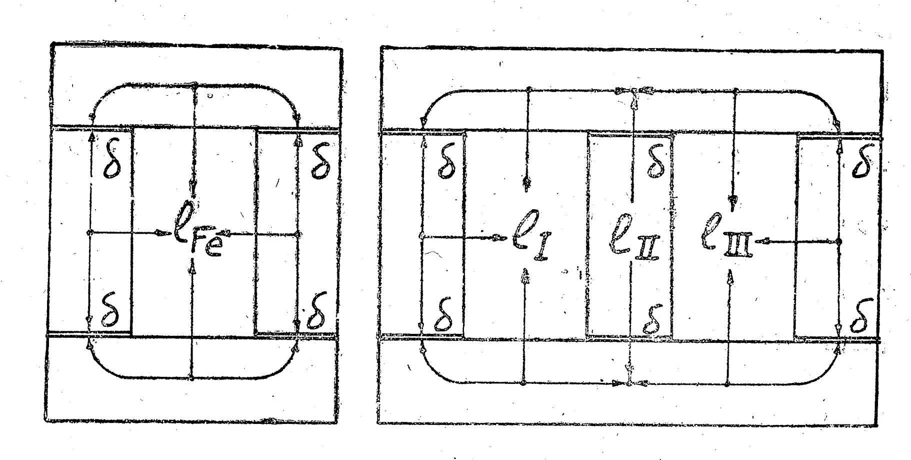
يتم عزل الموصلات التى تتكون منها الملفات ، قبل لفها ، على النحو التالى : يكون العازل الأســاسى شريط من الورق سمكه 0.05 مم ، وهو يتحمـل حـوالى 750 فولت دائمة . ويغطى الموصل بطبقة رقيقة من الورنيش قبل لفه بالورق . ويستخدم شريط من القطن لف الموصل ، لكى يحفظ عليه شريط الورق العازل ، يكون سمكه 0.1 مم . ويتكون أقل عزل للموصل من طبقتين من الورق ، وفوقهما طبقة من شريط القطن ، للاحتفاظ بالعازل على الموصل . ويؤدى الخوف من خطر الضغوط العارمة إلى تقوية اللفات الطرفية فى الملفات ، حتى لا ينهار العازل عليها ، تحت تأثير المجالات الكهربية الشديدة ، الناشئة عن هذه الضغوط . وتتوقف قيمة نسبة عدد اللفات الطرفية التى تتم تقويتها ، إلى لفات ملف الضغط العالى ، على قيمة الضغط العالى نفسه ، فتقل النسبة بزيادة قيمة الضغط ، بطبيعة الحـال . وتنص بعض المواصفات القياسية على أن تكون هذه النسبة حوالى 3% بالنسبة للضغوط المعتادة (أقل من 100 كيلوفولت) ، وتقل حتى تصل إلى حوالى 1.75 % عند 132 KV ، وتصـل إلى حـوالى 0.75 % عند 220 KV . هـذا وتكون التقوية أعلى ما يمكن فى الجزء الطرفى ، الذى يمثل 1% ، ثم 0.58 % ، ثم 0.25 % من اللفات ، على الترتيب .

حساب تيار اللاحمل (Calculation of the no load current)

اولا — حساب تيار المغطسة I_{ou} :

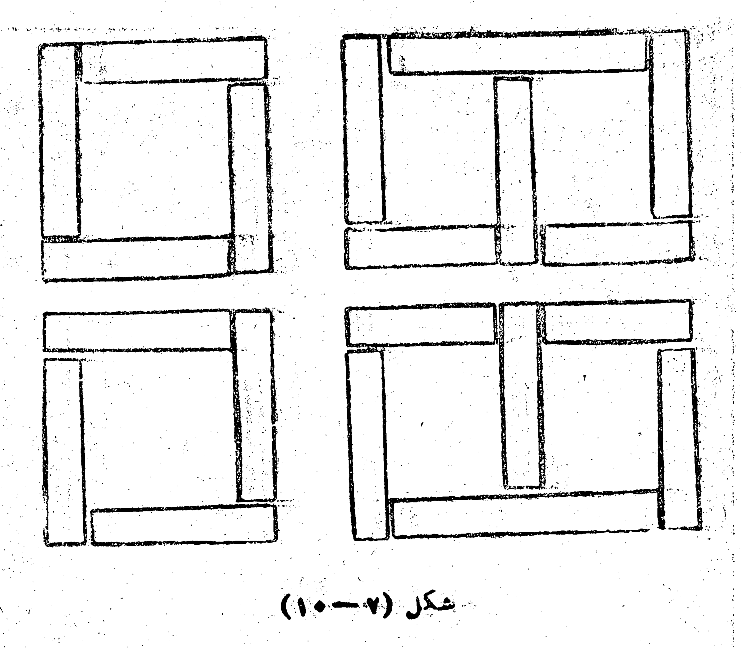
لكى نحصل على قيمة النهاية العظمى لكثافة الخطوط B ، فى القلب الحديدى ،

يجب أن يعطى الملف الابتدائى الأمبير لفات AT_t ، عندما تكون النهاية العظمى لتيار المغطسة فيه $\sqrt{2}\ I_{ou}$ ، وذلك على أساس أن القيمة الفعالة لتيار المغطسة هى I_{ou} ، كما هو مبين فى مخطط متجهات المحول شكل (٦ — ٧ ب) ص ٣٢٧ . وتعمل هذه الأمبير لفات على دفع الفيض المغناطيسى المتبادل ϕ_m فى الدائرة المغناطيسية التى تتكون من حديد القلب والفك ، والثغرات الهوائية عند كل اتصال بينهما ، كما هو واضح فى شكل (٦ — ١٠) ، بالنسبة للمحول مفرد المرحلة ، والمحول ثلاثى المراحل . ويعمل وجود الثغرات الهوائية ، وتعددها ، على زيادة قيمة



شكل (٦ — ١٠)

الأمبير لفات المطلوبة ، وبالتالى زيادة قيمة تيار المغطسة I_{ou} ، مما يؤدى إلى تقليل قيمة معامل القدرة للمحول . وللحد من تأثير هذه الثغرات الهوائية ، على هذا النحو ، يراعى فى تجميع الرقائق فى القلب والفك ، أن تتداخل فيما بينها ، فى الطبقات المتتالية ، بحيث تختلف ، تبعا لذلك ، أطوال الرقائق ، فى الفك والقلب ، فى كل طبقتين متتاليتين أ ، ب ، كما هو مبين فى شكل (٧ — ١٠) بالنسبة لكل من نوعى المحولات ، مفرد المرحلة ، وثلاثى المراحل .



شكل (٧ — ١٠)

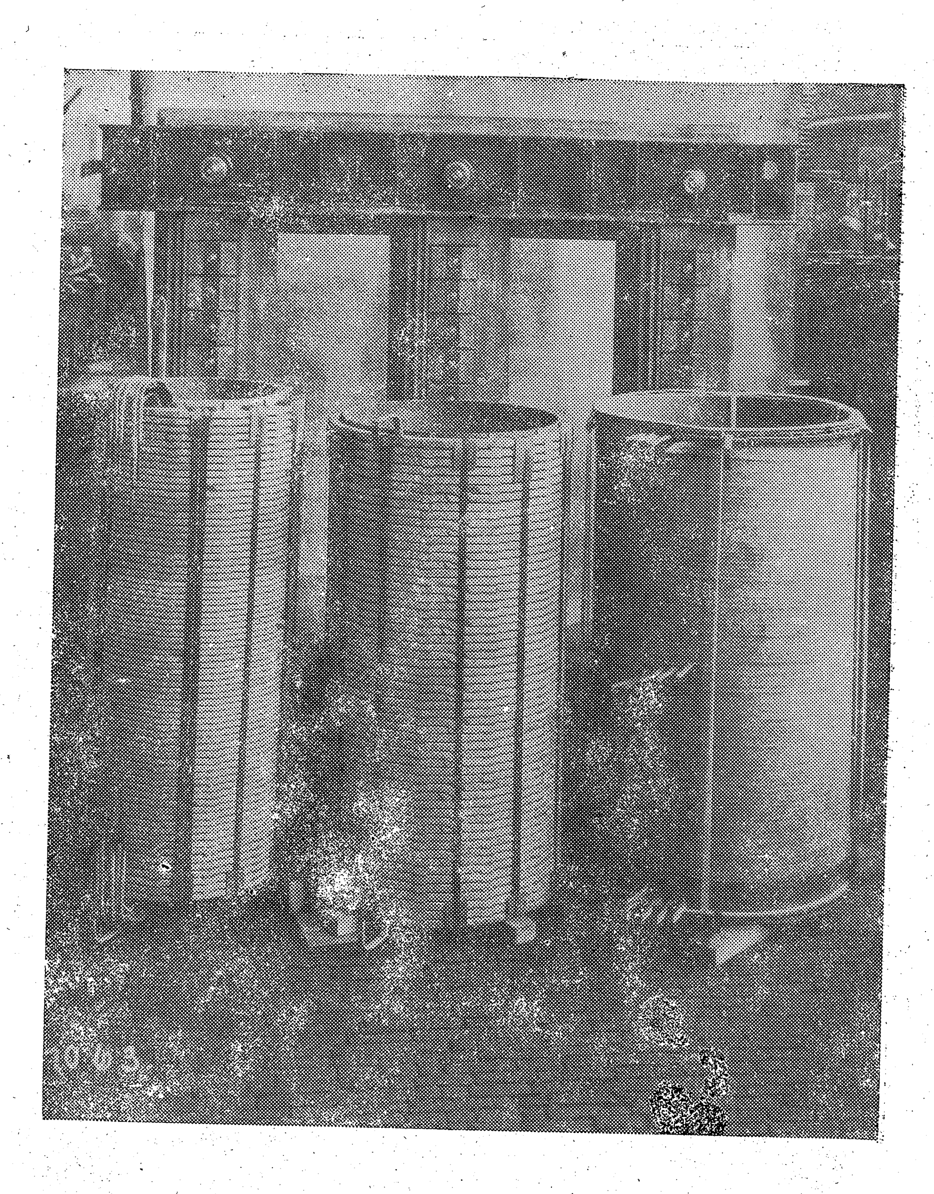
يبين شكل (٨ — ١٠) محولا ، من المحولات الكبيرة التى تصنعها شركة الـ AEG ، وهو ذو خمسة سيقان (Five core) ، وذلك قبل وضع الفك العلوى ، الذى يتم وضعه رقيقة برقيقة ، بحيث تتداخل رقائق الفك بين الأجزاء البارزة من رقائق السيقان ، يتم ربط رقائق الفك بعد ذلك ، على النحو المبين بالنسبة للفك الأسفل . أما السيقان ، فيكون ربط رقائقها بنفس الطريقة المربوطة بها رقائق الساق الخامس ، إلى أقصى اليسار من الشكل . لاحظ أن مساحة مقطع كل من الساقين الطرفين تساوى نصف مساحة مقطع كل من السيقان الثلاثة الوسطى .

يبين شكل (٩ — ١٠) (من نفس الشركة AEG) ملفى الضغط المنخفض ، والضغط العالى ، الجاهزين ، وذلك قبل وضعهما على القلب الحديدى ، المبين مربوطا ، مع الفك ، وراء الملفين .

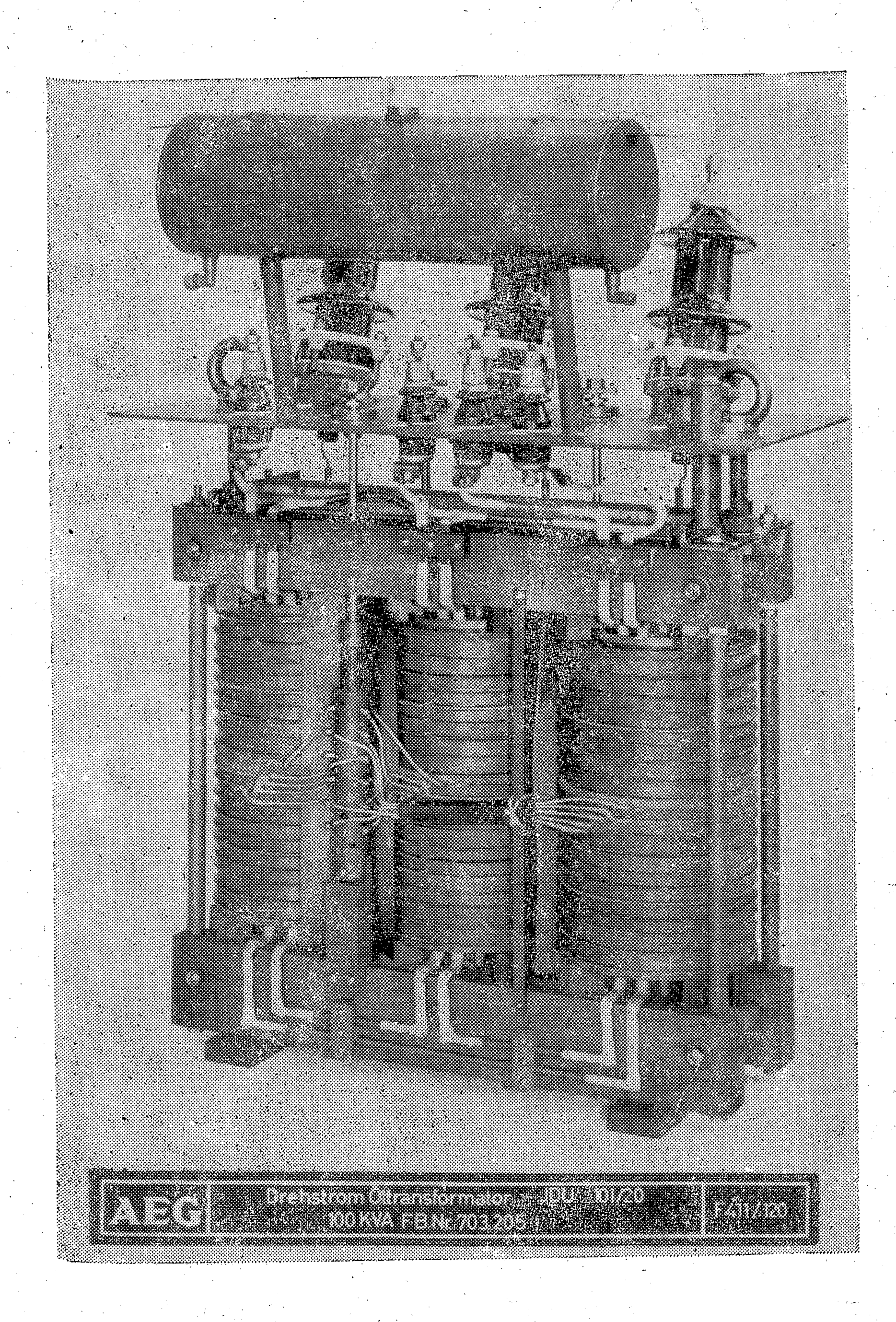
يبين شكل (١٠ — ١٠) محولا جاهزا (شركة الـ AEG) بملفاته فوق القلب



شكل (٨ — ١٠)



شكل (٩ — ١٠)



شكل (١٠ — ١٠)

الحديدى ، بعد ربط رقائق الفك ، وتركيب كافة الملحقات ، وذلك قبل وضع المحول فى صهريج الزيت . والمرجو أن تلاحظ كافة التفصيلات ، الواضحة وضوحا تاما بالشكل ، والخاصة بتجميع الأجزاء المختلفة للمحول.

يكون حساب القيمة الفعالة لتيار المغطسة I_{ou} ، من العلاقات المعروفة ، بالنسبة لحسابات الدائرة المغناطيسية (هندسة الآلات الكهربية ص ٦٩ — ٧٢) ، على النحو التالى :

١ — فى المحول مفرد المرحلة :

بالرجوع إلى الجزء الأيسر من شكل (٦ — ١٠) نجد أن :

$$AT_t = 0{,}8\,B \times 4\,\delta + H\,l_{Fe} \quad \cdots \quad (١٠ — ٢٠)$$

حيث δ هى طول الثغرة الهوائية بين الساق والفك بالسنتيمترات ، و H معدل انحدار الضغط المغناطيسى فى الرقائق بالأمبير لفة/سم ، المناظر الكثافة الخطوط المغناطيسيه B ، على منحنى تمغطس حديد هذه الرقائق . وتتوقف قيمة δ على عوامل كثيرة ، بحيث لايمكن تحديدها بالضبط ، ولذلك تفرض لها قيمة تجريبية من 0.0035 إلى 0.005 سنتيمترا .

$$AT_t = \sqrt{2}\,I_{ou} \times T_1 \quad , \quad I_{ou} = \frac{AT_t}{\sqrt{2}\;T_1} \quad \cdots\cdots \quad (١٠ — ٢١)$$

٢ فى المحول ثلاثى المراحل :

سبق أن ذكرنا أن تيار المغطسة لايكون متساوى القيمة فى المراحل الثلاث ، بسبب اختلاف أطوال مسارات الفيض المغناطيسى $l_{III} = l$ و l_{II} ، كما هو واضح فى الجزء الأيمن من شكل (٦ ١٠) . وتبعا لذلك يكون تيارا المغطسة

متساويين فى المرحلتين I , III ، على الساقين الطرفيين ، ويكون تيار المغنطة فى المرحلة II ، على الساق الوسطى ، أصغر منهما وعلى هذا الأساس ، نجد أن :

$$I_{ouI} = I_{ouIII} = \frac{0.8\,B \times 2\,\delta + H\,l_I}{\sqrt{2}\,T_1}$$

$$I_{ouII} = \frac{0.8\,B \times 2\,\delta + H\,l_{II}}{\sqrt{2}\,T_1}$$

$$I_{ou} = \frac{2\,I_{ouI} + I_{ouII}}{3} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (١٠ - ٢٢)$$

ثانيا — حساب تيار المفقودات I_{oa} ، وتيار اللاحمل I_o :

يتم حساب تيار المفقودات I_{oa} ، باعتباره فى توافق مرحلى مع ضغط الينبوع V_1 ، وعلى أساس الدائرة المكافئة للمحول المبينة فى شكل (٩ — ٧ أ ، ب) على التالى :

١ — فى حالة المحول مفرد المرحلة :

$$I_{oa} = \frac{P_{Fe}}{V_1} \quad , \quad I_o = \sqrt{I^2_{ou} + I^2_{oa}}$$

٢ — فى حالة المحول الثلاثى المراحل :

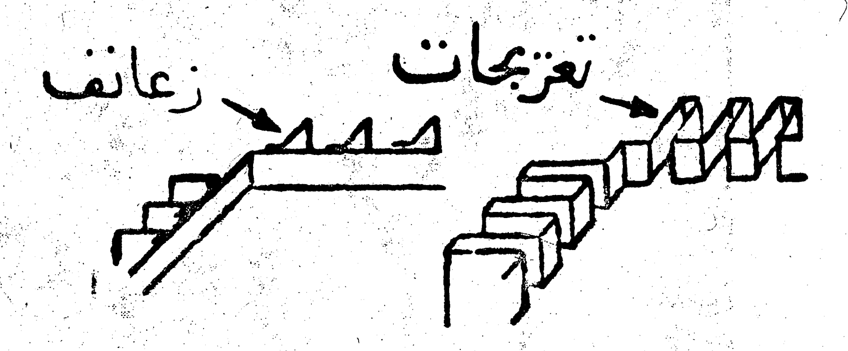
$$I_{oa} = \frac{P_{Fe}}{3V_1} \quad , \quad I_o = \sqrt{I^2_{ou} + I^2_{oa}} \quad \cdot\cdot \ (١٠ — ٢٣)$$

ويجب ألا تزيد قيمة تيار اللاحمل عن 10 % من تيار الحمل الكامل عادة .

صهريج الزيت : (The oil tank)

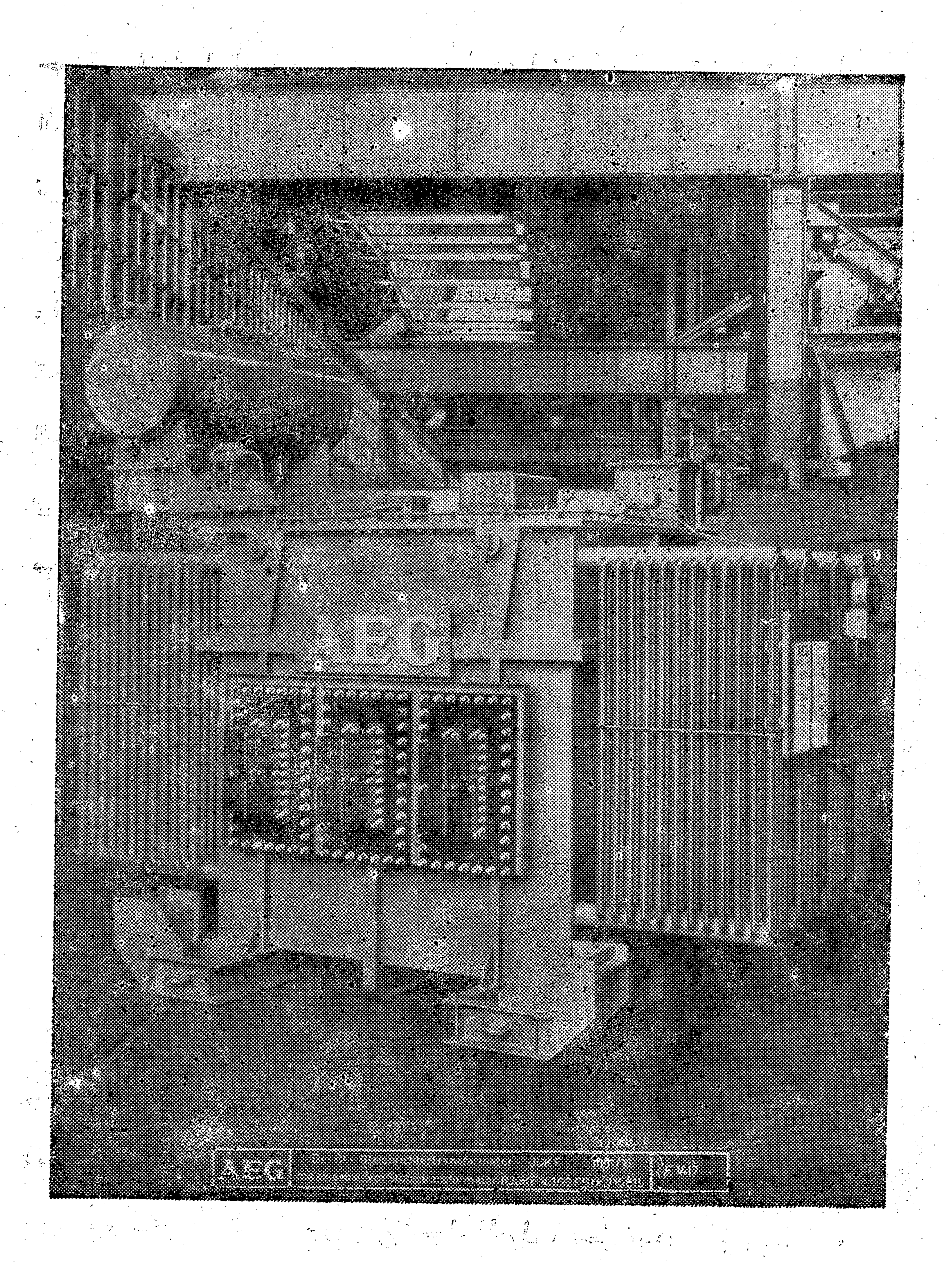
هذا هو الوعاء الحديدى الكبير ، الذى يحتوى على المحول ، بحيث يصبح مغمورا فى الزيت ، الذى يمتلىء به الوعاء . والغرض من غمر المحول فى الزيت

جودة عزل المحول أولا ، بحيث يتم عزله عن المؤثرات التى تتسبب فى انهيار العازل على الموصلات ، وحدوث دائرة قصر فى الملفات ، وأهمها الرطوبة ، ثم تزويد المحول ثانيا بوسيلة فعالة للتبريد ، عن طريق تبريد الزيت ، الذى يمكن أن يصل إلى الأجزاء الداخلية للملفات ، بفعل تيارات الحمل الحرارية الطبيعية .
وقد نترك الزيت يبرد ، بطريقة طبيعية ، عند ملامسته لجدران الصهريج ، المعرضة للجو الخارجى . ويمكن زيادة فاعلية التبريد ، بهذه الطريقة ، بزيادة سطح الصهريج المعرض للجو الخارجى ، وذلك بعمل تعريجات (corrugations) ، فى جدران الصهريج ، أو تزويدها بزعانف (Ribs or Fins) جانبية ، كما هو مبين فى شكل (١١ — ١٠) . كما يمكن الوصول إلى نفس الغرض عن طريق

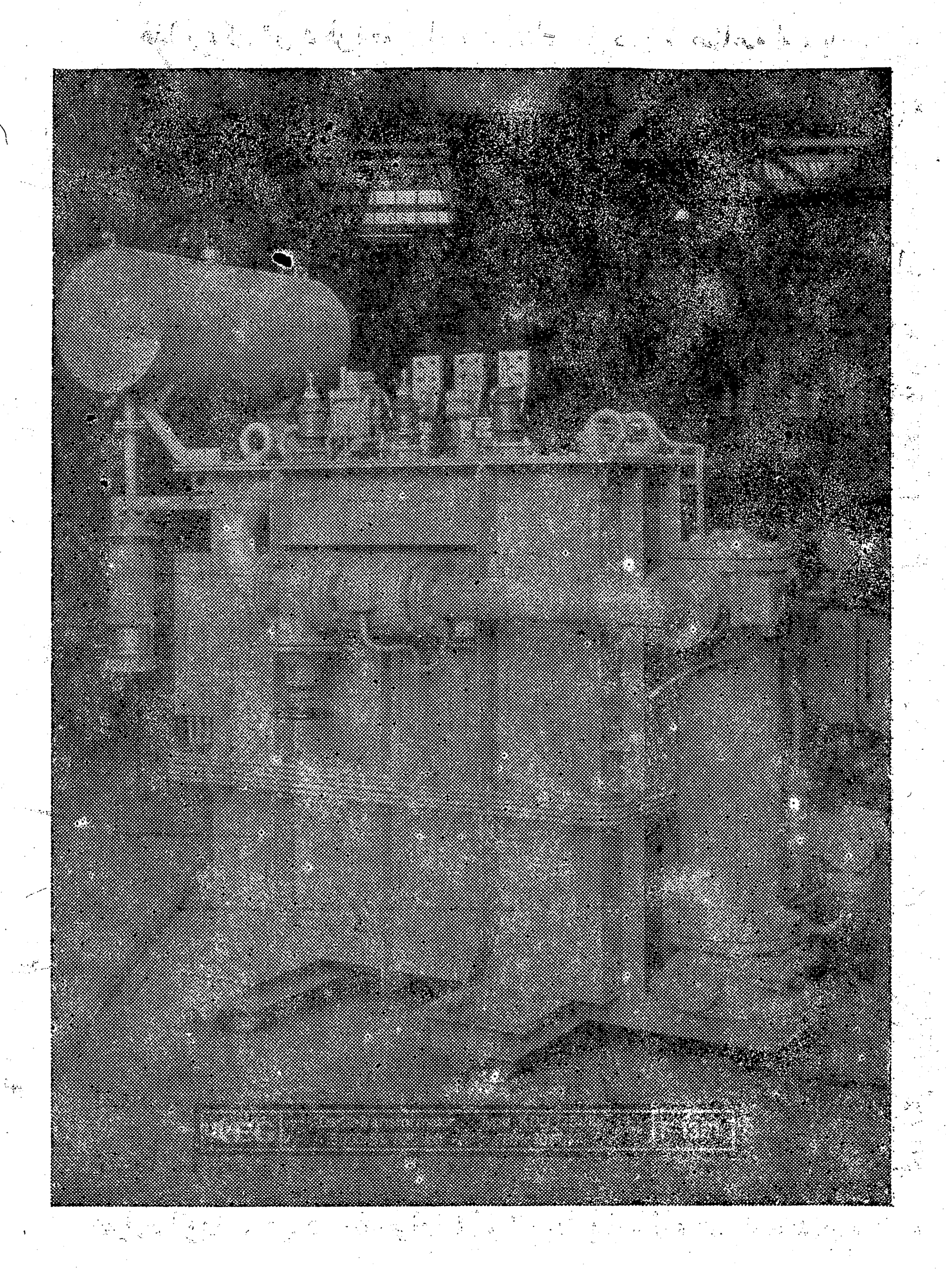


شكل (١١ — ١٠)

تزويد الصهريج بطبقات من الأنابيب الجانبية ، التى تحمل الزيت الساخن من قمة الصهريج ، لكى يبرد أثناء نزوله عن طريقها ، ثم يدخل الصهريج عند قاعه ، باردا ، ويسخن فى أثناء مروره على أجزاء المحول ، بفعل تيار الحمل الطبيعى ، من القاع إلى القمة . يبين شكل (١٢ — ١٠) أحد المحولات الـ AEG من هذا النوع .



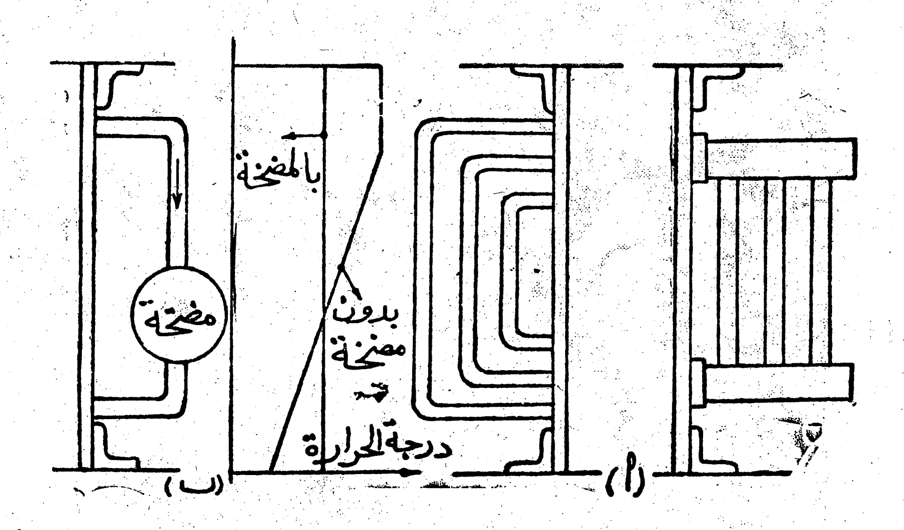
شكل (١٢ – ١٠)



شكل (١٣ — ١٠)

هذا ويمكن تبريد الزيت بالماء ، فى أثناء عمل دورة صناعية له ، باستخدام مضخة خاصة تلحق بالمحول ، وهى الموجودة على يمينه فى شكل (١٣ — ١٠)، الخاص بمحول من هذا النوع لشركة الـ AEG .

يبين شكل (١٤ — ١٠ أ) كيف ترتب الأنابيب ، وطريقة انتمائها إلى جدار الصهريج ، كما يبين شكل (١٤ — ١٠ب) توزيع درجات حرارة الزيت على مدى ارتفاع الصهريج ، عند استخدام المضخة ، وبدونها ، ويتضح فيه كيف يؤدى



شكل (١٤ — ١٠)

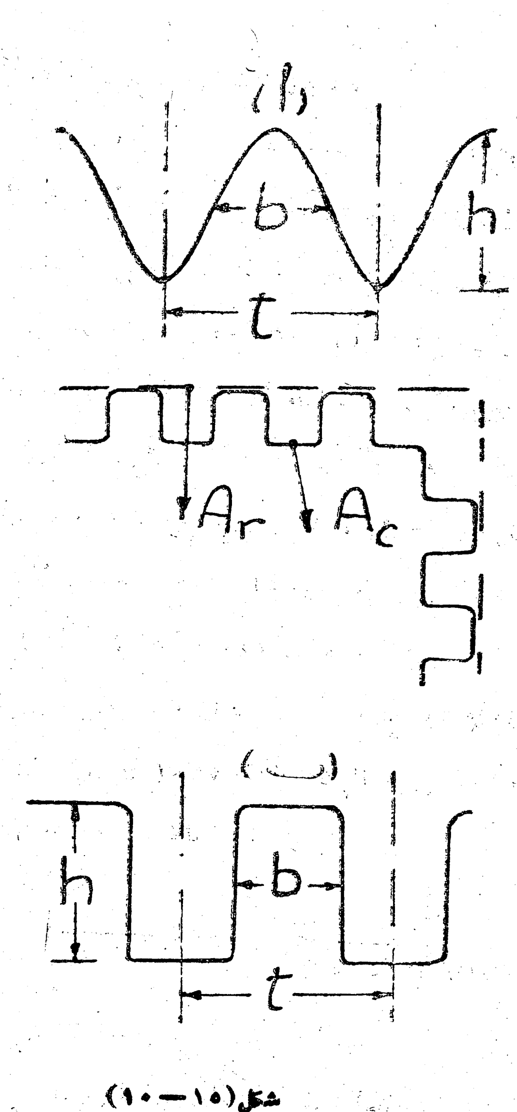
استخدام المضخة الى تساوى درجة حرارة الزيت على مدى ارتفاع الصهريج تقريبا . نستطيع ، بناء على ذلك ، تصميم المحول على أساس ارتفاع فى درجة حرارة الزيت ، عن درجة حرارة الجو المحيط بالمحول ، عند استخدام المضخة ، يزيد عن ارتفاع درجة الحرارة ، عند عدم استخدام المضخه . لذات نفترض زيادة فى درجة الحرارة Δt تساوى $40°C$ ، فى حالة عدم استخدام المضخة ، وتساوى

48 °C فى حالة استخدامها . ونتيجة لتحديد Δt ، بالرقم المعطى ، أو بغيره ، على حسب نوع المواد المستخدمة فى العزل ، وتبعا للمواصفات المتداولة ، نستطيع تحديد مساحة سطح التبريد اللازم على النحو التالى : إذا فرضنا أن السطح المعرض للجو الخارجى (سواء كان سطح الصهريج ، بالتعريجات ، أو بدونها ، أوسطح الانابيب) ، الذى تنتقل منه الحرارة بالحمل (convection) أو التوصيل (conduction) هو A_c من الامتار المربعة . والذى تنتقل منه الحرارة بالاشعاع (radiation) هو A_r من الامتار المربعة ، وبفرض أن القيمة التجريبية لمعامل انتقال الحرارة بالحمل والتوصيل u_c هى من 7 (فى حالة المحولات الكبيرة) إلى 8 (فى حالة المحولات الصغيرة) وات لكل متر مربع وفرق درجة حرارة واحدة ($u_c = 7 - 8\ W/°c.m^2$) ، وأن القيمة التجريبية لمعامل انتقال الحرارة بالإشعاع u_r هى حوالى 6 وات لكل متر مربع وفرق درجة حرارة واحدة ($u_r = 6\ W/°\ c.m^2$) ، وباعتبار أن P_v هى المفقودات الكلية فى المحول (الحديد والنحاس معا) ، نجد أن :

$$\Delta t = \frac{P_v}{u_r A_r + u_c A_c} \cong \frac{P_v}{6A_r + (7-8) A_c} \quad \cdots\cdots \quad (٢٤ - ١٠)$$

يكون حساب A_r على أساس المساحة الخالصة للسطح ، التى لا تتأثر بالإنعكاسات، أما A_c فهى عبارة عن السطح الكلى الملامس للجو الخارجى ، كما هو مبين فى شكل (١٥ — ١٠ أ) . وعند حساب كل من A_c و A_r لا يدخل فيهما مساحة سطح غطاء الصهريج وقاعه ، فيهملان للحصول على نتائج مأمونة العاقبة ، بالنسبة لإرتفاع درجة الحرارة ، على قدر الإمكان.

يكون تحديد عدد الانابيب ، وأقطارها ، ومن ثم مساحة سطوحها الخارجية



شكل (١٥ — ١٠)

على أساس المساحتين A_e ، A_r . أما بالنسبة لتعريجات جدار الصهريج ، فيكون عرض قناة الزيت a وعرض مجرى الهواء b ، وعمق التعريجات h ، على نحو ماهو مبين فى شكل (١٥ — ١٠) ، فى الحدود الآتية :

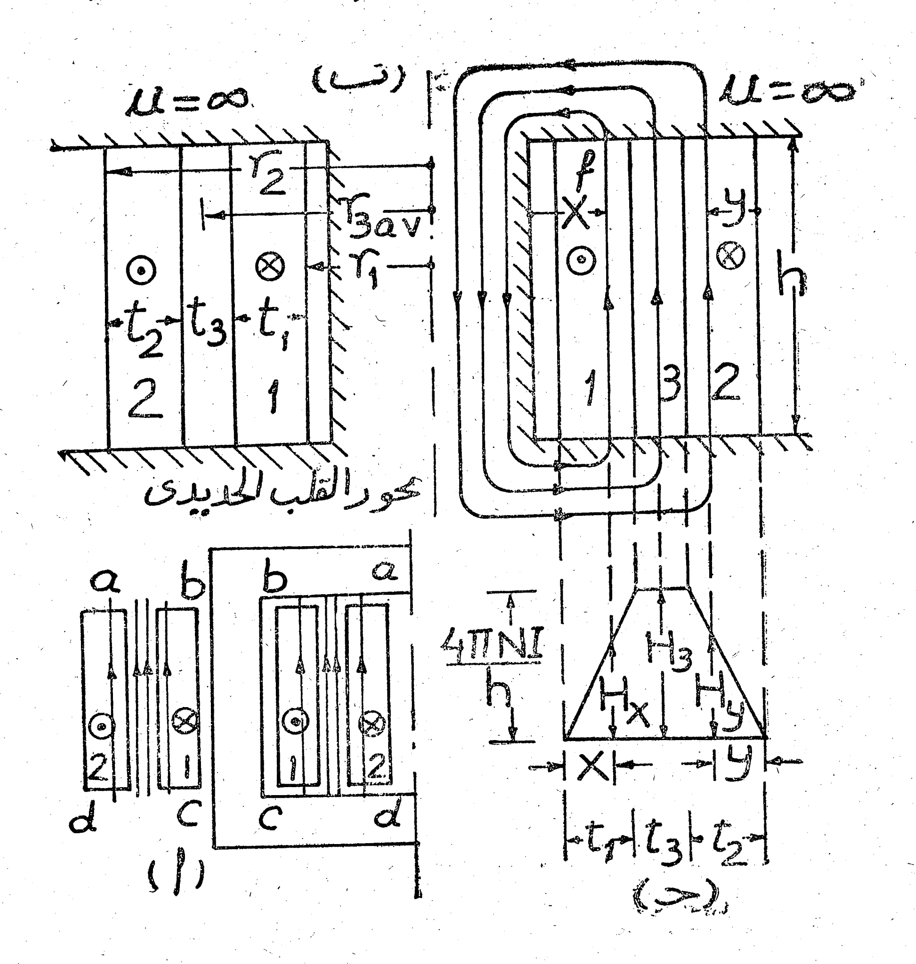
$$a = 5 - 30 \text{ mm} \quad , \quad b = 30 - 70 \text{ mm} \quad , \quad h \leq 400 \text{ mm}$$

وبذلك نجد أن عرض مجرى الهواء يكون أكبر من عرض قناة الزيت لزيادة فاعلية التبريد .

معاوقة المحول (Transformer impedance)

وضغط القصر (Short circuit voltage)

تتكون معاوقة المحول من المقاومة العادية للملفات ، ومعانعة تسربها . ويمكن



شكل (١٦ — ١٠)

حساب مقاومة كل من الملفين الابتدائى والثانوى ، بمعلومية مساحة مقطع السلك فى كل منهما ، والطول الكلى للسلك المستعمل ومقاومته النوعية ، وذلك عند درجة حرارة التشغيل، عند الحمل الكامل ، باعتبار الزيادة فى درجة حرارة الملفات حوالى 60° C . ويراعى أن المقاومة مع التيار المتردد تكون أكبر منها مع التيار المستمر ، وهى المقاومة المحسوبة على النحو المشار اليه ، وذلك بسبب الظاهرة القشرية . فما لم تكن الأسلاك مجدولة (Stranded) للتخلص من تلك الظاهرة ، تزداد المقاومة المحسوبة، بمعامل تجريبى، تتوقف قيمته على قيمة مساحة مقطع السلك . ويمكن استخدام المعادلة (٢١ — ٦) ص ٣١ ، على النحو المشار اليه . هذا ويمكن حساب المقاومة الكلية المكافئة، منسوبة إلى أى من الملفين ، بعد ذلك بسهولة .

تتوقف قيمة ممانعة التسرب لكل ملف على الفيض المتسرب حوله ، والمتشابك معه ، وكذلك على قيمة السماح المغناطيسى لمسار هذا الفيض . وسوف نشرح فيما يلى ، على هذا الأساس ، كيفية حساب الممانعة الكلية المكافئة ، منسوبة إلى أحد الملفين :

يبين شكل (١٦ — ١٠ ب) الملفين الابتدائى (1) ، والثانوى (2) ، للمحول مفرد المرحلة ، أو فى مرحلة محول ثلاثى المراحل ، باعتبار أن الحديد حولهما ذو معامل نفاذ مغناطيسى لا نهائى (infinite magnetic permeability) ، وأن المقاومة المغناطيسية للفيض المتسرب تتركز ، بناء على ذلك ، فى المسارات الهوائية . إذا كان التيار المار فى أحد الملفين ، الذى عدد لفاته T ، هو I ، فان القوة الدافعة المغناطيسية ، التى ينجم عنها مرور الفيض المتسرب ، لكل من الملفين ، الابتدائى والثانوى ، تصبح $4\pi TI$ جلبرت ($I_1T_1 = I_2T_2 = IT$) .

ويمكننا، فى هذه الحالة ، اعتبار أن ممانعة القسرب المكافئة ناتجة عن الفيض المتسرب، الذى ينشأ حول الملفين، بوضعهما على الساق الحديدى ، كما فى شكل (١٦ — ١٠ ب) ، عندما يوصلان على التوالى ، بحيث تكون قوتاهما الدافعتان المغناطيسيتان متضادتين . نجد ، على هذا الأساس ، أن الخطوط المغناطيسية فى المسار رقم 1 تتشابك مع الجزء X / t_1 من لفات الملف الابتدائى . وبذلك تكون قيمة القوة الدافعة المغناطيسية F_x ، التى تدفع الخطوط المغناطيسية فى هذا المسار عبارة عن :

$$F_x = \frac{4 \pi T I X}{t_1} \qquad (١٠—٢٥)$$

وتتحقق المعادلة (٢٥ — ١٠) باستخدام مجموعة الوحدات غير المنسقة ، باعتبار أن المسار فى الهواء (هندســـة الآلات الكهربية ص ٨٠ إلى ٨٤) . وتكون قيمة معدل انحدار الضغط المغناطيسى H_x حول المسار 1f ثابتة ، ومقدارها بالأورستد هو :

$$H = \frac{F_x}{h} = \frac{4 \pi T I x}{h t_1} \qquad (١٠—٢٦)$$

تكون قيمة H_x صفراً عند السطح الداخلى للملف الإبتـدائى ($x = 0$) كما أنها تكون أكبر ما يمكن ، وتساوى $4 \pi TI/h$ ، عند السطح الخارجى لهذا الملف ($x = t_1$) ، حيث t_1 هو سمك الملف الابتدائى بالسنتيمترات ، كما هو مبين فى شكل (١٦ — ١٠ ب) مع بقية الأبعاد الموضحة ، وهى t_2 سمك الملف الثانوى و t_3 عرض الفراغ بين الملفين ، من النحاس العارى إلى النحاس العارى و h ارتفاع الملفين (بفرض أنهما متساويان فى الطول) و r_1 نصف قطر الدائرة من محور الساق الحديدى إلى السطح الداخلى للملف الابتدائى (على النحاس العارى)

و r_2 نصف قطر الدائرة من محور الساق الحديدى إلى السطح الخارجى للملف الثانوى (على النحاس العارى أيضا) و r_{3av} نصف قطر الدائرة من محور الساق الحديدى حتى منتصف الفراغ بين الملفين .

تكون قيمة القوة الدافعة المغناطيسية H_3 حول أى مسار مثل 3 فى الفراغ بين الملفين ، ثابتة وتساوى $4\pi TI/h$ (تساوى $4\pi NI/h$ فى شكل (١٦ — ١٠ ح) باعتبار أن N هى نفسها عدد اللفات T) . ونظرا لأن القوة الدافعة المغناطيسية للملف 2 مضادة للقوة المغناطيسية الدافعة للملف 1 ، كما سبق ذكره ، تقل قيمة القوة الدافعة المغناطيسية الكلية المؤثرة ، للملفين معا ، فى أى مسار داخل الملف الثانوى ، مثل المسار 2 ، حتى تصل قيمتها إلى الصفر ، عند السطح الخارجى لهذا الملف ، كما هو مبين فى شكل (١٦ — ١٠ ح) . ويمكن ، بناء على ذلك ، حساب قيمة القوة الدافعة المغناطيسية H_y حول المسار 2 بوضع y بدلا من x فى المعادلة (٢٦ — ١٠) ، فنجد أن :

$$H_y = \frac{F_y}{h} = \frac{4\pi T I y}{h t_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٢٧ — ١٠)$$

يمكننا حساب قيمة معامل الحث الذاتى المكافىء L_{eq} ، الذى تحسب به قيمة ممانعة التسرب المكافئة X_{eq} ، من حساب الطاقة المختزنة فى المجال المغناطيسى للتسرب ، الذى يحتل ، بناء على افتراضنا أن معامل النفاذ للحديد لانهائى ، الفراغ الكائن بين السطح الداخلى للملف الابتدائى والسطح الخارجى للملف الثانوى (من النحاس العارى إلى النحاس العارى) ، وذلك على أساس أن قيمة الطاقة المختزنة تساوى $\frac{1}{2} I^2 L_{eq}$ ، عندما تكون قيمة التيار الفعالة I . بالرجوع إلى كتاب هندسة الآلات الكهربية ص ١١٢ المعادلة (٥٧ — ٢) نجد أن الطاقة الكهربية ،

التى تختزن فى كل سنتيمتر مكعب فى المجال المغناطيسى ، عندما تزداد قيمة كثافة الخطوط المغناطيسية من صفر إلى B عبارة عن $\frac{1}{4\pi} \int_0^B H\,dB$ وتكون الطاقة النوعية المختزنة فى الهواء بالأرج لكل سنتيمتر مكعب عبارة عن :

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^B B\,dB = \frac{B^2}{8\pi} = \frac{H^2}{8\pi} \cdots \quad (١٠—٢٨)$$

نظرا لأن قيمة H متغيرة من صفر إلى H_3 فى المسافة من $x=0$ إلى $x=t_1$ وثابتة عند القيمة H_3 فى المسافة t_3 ، ثم متغيرة من القيمة H_3 إلى الصفر فى المسافة t_2 ، يجب اجراء التكامل السابق على ثلاث دفعات ، تبعا لذلك ، وجمع النتائج فى النهاية . ويكون الحساب فى خلال ذلك كله على أساس عنصر الطاقة المختزنة dW_x ، فى حلقة اسطوانية ، ارتفاعها h ، وسمكها dx ، ونصف قطرها (r_1+x) حيث تكون شدة المجال المغناطيسى H_x . يكون حجم المجال المغناطيسى ، الذى تحصره هذه الحلقة فى سمكها dx ، عبارة عن $2\pi(r_1+x)h\,dx$. وبذلك نجد أن الطاقة المختزنة فى المجال المغناطيسى ، على مدى سمك الحلقة ، عبارة عن :

$$dW_x = \frac{H^2_x}{8\pi} \times 2\pi(r_1+x)h\,dx$$

$$= \frac{4\pi^2 I^2 T^2}{h\,t^2_1}(r_1+x)x^2\,dx \cdots\cdots \quad (١٠-٢٩)$$

ويكون مقدار الطاقة المختزنة W_1 فى المجال المغناطيسى ، على مدى سمك الملف الابتدائى t_1 ، عبارة عن :

$$W_1 = \frac{4\pi^2 I^2 T^2}{ht^2_1} \int_0^{t_1} (r_1+x)x^2\,dx$$

$$= \frac{4\pi^2 I^2 T^2}{h}\left(\frac{r_1}{3}+\frac{t_1}{4}\right)t_1 \cdots\cdots \quad (١٠—٣٠)$$

كذلك يكون مقدار الطاقة المختزنة W_2 ، فى المجال المغناطيسى ، على مدى سمك الملف الثانوى t_2 ، عبارة عن :

$$W_2 = \frac{4\pi^2 I^2 T^2}{h t_2^2} \int_0^{t_2} (r_2 - y)\, y^2\, dy$$

$$= \frac{4\pi^2 I^2 T^2}{h} \left(\frac{r_2}{3} - \frac{t_2}{4} \right) t_2 \quad \cdots\cdots \quad (١٠—٣١)$$

كما يكون مقدار الطاقة المختزنة W_3 ، فى المجال المغناطيسى ، على مدى المسافة بين الملفين t_3 ، حيث تكون شدة المجال H_3 ثابتة القيمة ، عبارة عن :

$$W_3 = \frac{H_3^2}{8\pi} \times 2\pi\, r_{3av}\, t_3\, h$$

$$= \frac{4\pi^2 I^2 T^2}{h} r_{3av}\, t_3 \quad \cdots\cdots \quad (١٠—٣٢)$$

وبمساواة الطاقة الكلية المختزنة بالقيمة $\frac{1}{2} I^2 L_{eq}$ نحصل على قيمة L_{eq} ، حيث :

$$L_{eq} = \frac{2}{I^2} (W_1 + W_2 + W_3)$$

$$= \frac{8\pi^2 T^2}{h} \left[\left(\frac{r_1}{3} + \frac{t_1}{4} \right) t_1 \right.$$

$$\left. + \left(\frac{r_2}{3} - \frac{t_2}{4} \right) t_2 + r_{3av}\, t_3 \right] \quad \cdots\cdots \quad (١٠—٣٣)$$

وتكون L_{eq} ، كما تعطيها المعادلة (٣٣—١٠) بالوحدات الكهرومغناطيسية المطلقة ، (e. m. u.) ولكى نحصل عليها بالوحدات العملية ، وهى الهنرى ، يجب أن نضرب المعادلة فى 10^{-9} . هذا ويمكن تبسيط المعادلة بتقريبها وذلك

باعتبار أن $\frac{t_1}{4} + \frac{r_1}{3}$ يساوى $\frac{r_{1av}}{3}$ ، حيث r_{1av} هو نصف القطر من محور الساق إلى منتصف الملف الابتدائى تقريبا ، وكذلك أن $\frac{t_2}{4} - \frac{r_2}{3}$ يساوى $\frac{r_{2av}}{3}$ ، حيث r_{2av} هو نصف القطر من محور الساق إلى منتصف الملف الثانوى تقريبا . وعلى هذا الأساس نجد أن :

$$L_{eq} = \frac{8 \pi^2 T^2 \times 10^{-9}}{h} \left(\frac{r_{1av} t_1}{3} + \frac{r_{2av} t_2}{3} + r_{3va} t_3 \right) \quad \ldots\ldots \quad (١٠-٣٤)$$

ونحصل على قيمة الممانعة المكافئة بالضرب فى $2\pi f$ ($= 314$ إذا كانت $f = 50$) . فاذا وضعنا T تساوى T_1 ، نحصل على قيمة الممانعة المكافئة منسوبة إلى الملف الابتدائى ، وإذا وضعنا T تساوى T_2 ، نحصل على قيمة الممانعة المكافئة منسوبة إلى الملف الثانوى .

$$X_{1eq} = \frac{16 \pi^3 T^2{}_1 f \times 10^{-9}}{h} \left(\frac{r_{1av} t_1}{3} + \frac{r_{2av} t_2}{3} + r_{3av} t_3 \right) \Omega$$

$$X_{2eq} = \frac{16 \pi^3 T^2{}_2 f \times 10^{-9}}{h} \left(\frac{r_{1av} t_1}{3} + \frac{r_{2av} t_2}{3} + r_{3av} t_3 \right) \Omega \quad \ldots\ldots \quad (١٠-٣٥)$$

نحصل على قيمة أعلى قليلا من القيمة الحقيقية لممانعة التسرب ، وذلك بسبب المفروضات التى تم على أساسها استنتاج المعادلتين (٣٥ــ ١٠) ، ولذلك يستخدم معامل تجريبى أقل من الواحد الصحيح ، لتصحيح قيمتى X_{1eq} ، X_{2eq} ، اللتين

حصلنا عليها . وتتوقف قيمة هذا المعامل التجريبى على الخبرة السابقة فى صناعة المحولات ، وتختلف قيمته من مصنع إلى آخر .

تتوقف قيمة ضغط القصر أساسا على قيمة المانعة المكافئة . وضغط القصر هو عبارة عن الضغط ، اللازم توصيله على طرفى الملف الابتدائى ، لتمرير تيار قصر فى المحول I_{sc} ، عندما يكون طرفا الملف الثانوى مقصورين ، يساوى تيار الحمل الكامل I_1 . وعلى هذا الأساس تتحدد قيمه ضغط القصر v_{sc} كما يأتى :

$$v_{sc} = I_{sc} Z_{eq} = I_1 Z_{1eq} = I_1 \sqrt{R^2_{1eq} + X^2_{1eq}} \cdots \cdots \quad (١٠ - ٣٦)$$

ويمكن تعديل قيمة ضغط القصر ، عن طريق تغيير قيمة X_{1eq} ، وذلك باعادة ترتيب اللفات ، فى كل من الملفين الابتدائى والثانوى ، بحيث تتغير قيم كل من r_{3av} ، r_{2av} ، r_{1av} ، بما يحقق الغرض المطلوب ،

مثال (١) :

Find suitable dimensions for the iron core and window as well as the number of turns of the primary and secondary copper windings, and the window space factor for the following 3 phase distribution transformer : 160 KVA, 6000/525 V, 50 c.p.s., star/star, oil immersed. The full load efficiency at 0.8 power factor is to be 97.6% and the total iron losses 735 W. The specific iron loss for the sheets used is 1.35 watts/kg at 10 kilo — gauss and 50 c.p.s.

Allow a maximum flux density in the iron core of 12500 lines/sq. cm and a current density of 2.8 amps/sq. mm in the copper windings. Take specific weight of iron 7.8 gms/cubic cm, Ç = 37, and a factor of

1.1 to allow for additional iron losses.

$$P_v = P_{Fe} + P_{cu} = \frac{160 \times 0.8}{0.976} \times 0.024 = 3146 \ \text{W}$$

$$P_{cu} = 3146 - 735 = 2411 \quad \text{W}$$

$$\beta = \frac{P_{Fe}}{P_{cu}} = \frac{735}{2411} = 0.305$$

$$p_{Fe} = 1.1 \times \left(\frac{12500}{10000} \right)^2 \times 1.35 = 2.31 \ \text{W/Kg}$$

$$p_{cu} = 2.7\, j^2 = 2.7 \times 7.82 = 21.12 \ \text{W/Kg} \ , \ \frac{p_{cu}}{p_{Fe}} = 9.16$$

$$A_{Fe} = 37 \sqrt{\frac{160 \times 0.305 \times 9.16 \times 10^5}{50 \times 12500 \times 2.8}} = 187 \quad \text{cm}^2$$

$$E_t = \frac{E}{T} = 4.44 \times 50 \times 12500 \times 187 \times 10^{-8} = 5.18 \ \text{V/turn}$$

باعتبار أن نسبة مساحة الحديد الصافى إلى مساحة الدائرة المحيطة 0.72 :

$$d = \sqrt{\frac{187}{0.72} \times \frac{4}{\pi}} = 18.2 \ \text{cms}$$

ويكون عرض الدرجة الأولى a فى القلب الحديدى ، ذى ثلاث الدرجات ، وعرض الدرجة الثانية b ، وعرض الدرجة الثالثه c ، عبارة عن :

$$a = 0.427 \times 18.2 = 7.75 \ \text{cms}$$

$$b = 0.707 \times 18.2 = 12.88 \ \text{cms}$$

$$c = 0.905 \times 18.2 = 16.5 \ \text{cms}$$

مساحة الحديد الكلية بالعازل وقناة التبريد :

$$\frac{187}{0.72} \times 0.86 = 223 \text{ cm}^2$$

بأخذ قناة تبريد ، يمر فيها الزيت ، عرضها 0.9 سم ، تكون مساحتها 14.95 سم٢ ، وبذلك تصبح مساحة الحديد ، والعـــــازل بين الرقائق $223 - 14.95 = 208.06$ سم٢ .

$$A_{Fe} = 208 \times 0.9 \cong 187 \text{ cm}^2$$

$$G_{Fe} = \frac{735}{2.31} = 318.5 \text{ Kg}$$

$$G_{cu} = \frac{2411}{21.15} = 114 \text{ Kg}$$

$$\alpha = \frac{G_{Fe}}{G_{cu}} = \frac{318.5}{114} = 2.79 \qquad (2 \rightarrow 4)$$

$$v_{Fe} = A_{Fe} \times l_{Fe} = \frac{318.5 \times 10^3}{7.8} = 4.07 \times 10^4 \text{ cm}^3$$

$$l_{Fe} = \frac{4.07 \times 10^4}{187} = 218 \text{ cms}$$

$$l_c = 3\text{H} = \frac{l_{Fe}}{2} \quad , \quad \text{H} = \frac{l_{Fe}}{6} = 36.3 \text{ cms}$$

$$l_y = \frac{l_{Fe}}{2} = 2\left(2\text{C} + d + \frac{\pi d}{2}\right)$$

$$\text{C} = \frac{218}{8} - \frac{18.2}{2} - \frac{\pi \times 18.2}{4} = 1.72 \text{ cms}$$

$$T_2 \cong \frac{525}{\sqrt{3} \times 5.18} \cong 58.4 \rightarrow T_2 = 58$$

$$T_1 \cong \frac{6000}{\sqrt{3} \times 5.18} \cong 668 \rightarrow T_1 = 66 \times \frac{58}{58.4} = 663$$

$$I_1 = \frac{160 \times 1000}{\sqrt{3} \times 6000} = 15.4\ A \quad , \quad a_1 = \frac{15.4}{2.8} = 5.5\ mm^2$$

$$I_2 = \frac{160 \times 1000}{\sqrt{3} \times 525} = 176\ A \quad , \quad a_2 = \frac{176}{2.8} = 62.8\ mm^2$$

$$K_w = \frac{5.5 \times 2 \times 663 + 62.8 \times 2 \times 58}{363 \times 167.2} = 0.24$$

مثال (٢) :

A 450 KVA, 10000/231 V, 50 c/s, 3 phase, core type, star/delta, oil immersed transformer has a maximum efficiency of 97.9 %, when it is delivering 40 % of its full load rating at 0.8 power factor lagging. The specific iron loss is 1.1 watts/Kg at 10 kilogauss and 50 c/s. while the current density in the primary and secondary windings is 2.9 amperes/sq. mm. The maximum flux density in the iron core and yoke is 12000 lines/sq. cm and the specific weight of iron is 7.8 grms/cubic cm, Take the constant $C = 40$, an additional iron loss factor of 1.1 and assume a filling factor for the iron core such that $A_{Fe} = 0.7\ d^2$. It is required to find the cross — sectional area A_{Fe} of the iron core, and the window space factor for the transformer.

$$P_v\ (\text{at}\ \eta_m) = \frac{450 \times 0.8}{0.979} \times 0.021 \times 0.4 = 3.1\ KW$$

$$P_{Fe} = x^2 P_{cu} = \frac{P_v}{2}\ (\text{at}\ \eta_m) = \frac{3.1}{2} = 1.55\ KW$$

$$x^2 = \left(\frac{I_m}{I_{f.l.}} \right)^2 = (0.4)^2 = 0.16 \quad , \quad \beta = \frac{P_{Fe}}{P_{cu}} = 0.16$$

$$P_{cu}(\text{عند الحمل الكامل}) = \frac{P_{Fe}}{x^2} = \frac{1.55}{0.16} = 9.7 \text{ KW}$$

$$p_{Fe} = 1.1 \times 1.44 \times 1.1 = 1.74 \text{ W/Kg}$$

$$P_{cu} = 2.7 \times (2.9)^2 = 22.7 \text{ W/Kg} \quad , \quad \frac{p_{cu}}{p_{Fe}} = 13.05$$

$$A_{Fe} = 40 \sqrt{\frac{450 \times 0.16 \times 13.06 \times 10^5}{50 \times 12000 \times 2.9}} = 294 \text{ cm}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{294}{0.7}} = 20.5 \text{ cms}$$

$$G_{Fe} = \frac{1550}{1.74} = 890 \text{ Kgs} \quad , \quad G_{cu} = \frac{9700}{22.7} = 427 \text{ Kgs}$$

$$\alpha = \frac{890}{427} \cong 2.1 \quad , \quad (\alpha = 2 - 4)$$

$$v_{Fe} = \frac{890}{7.8} \times 10^3 = 114200 \text{ cm}^3$$

$$l_{Fe} = \frac{114200}{294} = 388 \text{ cms}$$

$$l_y = l_c = \frac{388}{2} = 194 \text{ cms} \quad , \quad H = \frac{l_c}{3} = 64.7 \text{ cms}$$

$$C = \frac{388}{8} - \frac{20.5}{2} - \frac{\pi \times 20.5}{4} = 21.9 \text{ cms}$$

$$I_1 = \frac{450 \times 1000}{\sqrt{3} \times 10000} = 26 \text{ A} \quad , \quad I_2 = \frac{450 \times 1000}{3 \times 231} = 649 \text{ A}$$

$$a_1 = \frac{26}{2.9} = 8.97 \text{ mm}^2 \quad , \quad a_2 = \frac{649}{2.9} = 224 \text{ mm}^2$$

$$E_t = 4.44 \times 50 \times 12000 \times 294 \times 10^{-8} = 7.83 \text{ V/turn}$$

$$T_1 = \frac{10000}{\sqrt{3} \times 7.83} \simeq 737$$

$$T_2 = \frac{231}{7.83} \simeq 29.5$$

$$T_2 = 30 \quad , \quad T_1 = 737 \times \frac{30}{29.5} = 750$$

$$\delta = \frac{2\,(\,8.97 \times 750 + 224 \times 30\,)}{21.9 \times 64.7} = 0.19$$

مسائل على الباب العاشر

1 – Calculate the approximate overall dimensions for a 300 K.V.A., 6600/440 volt, 50 cycle, 3 phase type transformer. The following data may be used ;

e.m.f. per turn 9 volts.

maximum flux deusity 130000 lines per sq. cm.

current density 2.5 amperes per sq. mm.

wiudow space factor = 0.3

overall height = overall width.

2 — Determiue the dimensions of the core for a 200 KVA, 3300/480 V, single phase core type transformer to operate at a frequency of 50 cycles per second, assuming the following data :

Maximum flux density, 12000 lines per sq. cm, current density, 280 amp per sq. cm. volts per turn, 8; area factor for the 3 stepped core, 0.6, height of window/width of wiudow, 2, window space factor, 0.28.

3 – Find suitable dimensions of the iron core and window

as well as the number of turns of the primary and secondary copper windings and their cross sectional areas for the following transformer ;

200 KVA, 10000/400 volt, 50 c/s, star/star, oil immersed. The specific iron loss for the sheets used is 1.3 watts/kg. at 10 kilo gauss and 50 c/s. Efficiency of the transformer at full load and 0.8 power factor is to be 97.5 % with a total iron loss of 1.0 KW. Assnme a flux density in the iron core of 13000 lines/sq. cm. and a current density in the windings of 2.8 amps/sq. mm. C = 35, γ = 7.8 grms/cm^3

State the type of service for which the transformer is intended. Discuss reasons.

4 — Determiue the dimensions of the iron core and window for a 250 KVA, 10000/525 V, 3 phase, star/star, core type, oil immersed, distrbution transformer to operate at a frequency of 50 c/s, assuming :
Maximum flux density in the iron core 13000 lines/cm^2 and current density in the copper winding 2.7 amps/mm^2. Specific loss for the iron sheets used 1.3 W/kg at 10 Kilo — gauss and 50 c/s. Efficiency of transformer at full load 0.8 power factor is to be 97.6 %, with a total iron loss of 1200 W.

Find also the number of turns of the primary and secondary wiudings and their cross sectional areas. (specific weight of iron = 7.8 grams per cubic cm., C = 35).

5 — Find suitadle dimenoious of the iron core end window

for a transformer rated at 200 KVA, having the following particulars :

6000/400 V, 50 c/s, delta/star, oil immersed. The specific iron loss for the sheets used is 1.2 watts/kg at 10 kilo — lines/sq. cm and 50 c/s. The efficiency at full load, 0.8 power factor is 96.6 %, with a total iron loss of 940 W. Assume a flux density in the iron core of 12800 lines/cm^2 and a current density in the winding of 2.7 amps/sq. mm. Take C = 33.

6 — Find the main dimensions of a 500 KVA, 6600/380 volt, 50 c,p.s. 3 phase, core type, delta/star, oil cooled transformer. The following design data may be assumed :

voltage per turn = 8.1 volts, current density = 2.2 amps/sq. mm.

maximum density in core and yoke = 12000 gauss.

window space factor = 0.20.

Assumo that the iron section is single stepped cruciform ($A_{Fe} = 0.59\ d^2$). Find also the iron losses, if the specific iron loss at 10000 gauss, 50 c.p.s. is 1.4 watts/kg, and the specific weight of iron is 7.8. Allow 20 % for additional iron loss.

If the maximum efficiency occurs when the transformer is delivering 71 % of its KVA rating, find the weight of copper.

7 — The weight of iron sheets used in a particular 3

phase, star/star, core type, 400 KVA, 20000/231 volt. 50 c/s oil immersed transformer is 600 kg, and the total weight of copper in the primary and secondary windings is 237 kg. The maximum flux density in the iron core is 13500 lines/cm^2, and the current density in the windings is 3 ams/mm^2. The iron sheets used have a specific loss of 1.2 watts/kg at 10000 lines/cm^2 and 50 c/s. Specific weight of iron 7.8 gm/cm^3, C = 32, and a factor of 1.1 is to be taken to allow for additional iron losses.

(a) Find the cross sectional area of the iron core as well as the window space factor.

(b) Find the full load efficiency at 0.8 power factor lagging and also the fraction of full load at which maximum efficiency is obtained.

(c) State for what kind of service the transformer is intended and explain briefly why.

8 — The weight of sheet steel in the cores and yokes of a particular 3 phase, 200 KVA, 50 c/s, 6000/525 V, star/star, oil immersed transformer is 3.7 times the weight of copper in the windings. The specific iron loss at 10000 gauss and 50 c/s is 1.4 W/Kg. The working flux density is 12500 lines/cm^2 and the mean current density is 2.5 amps/mm^2 at full load. Assuming that the efficiency at full load and unity power factor is 97.8 %, find :

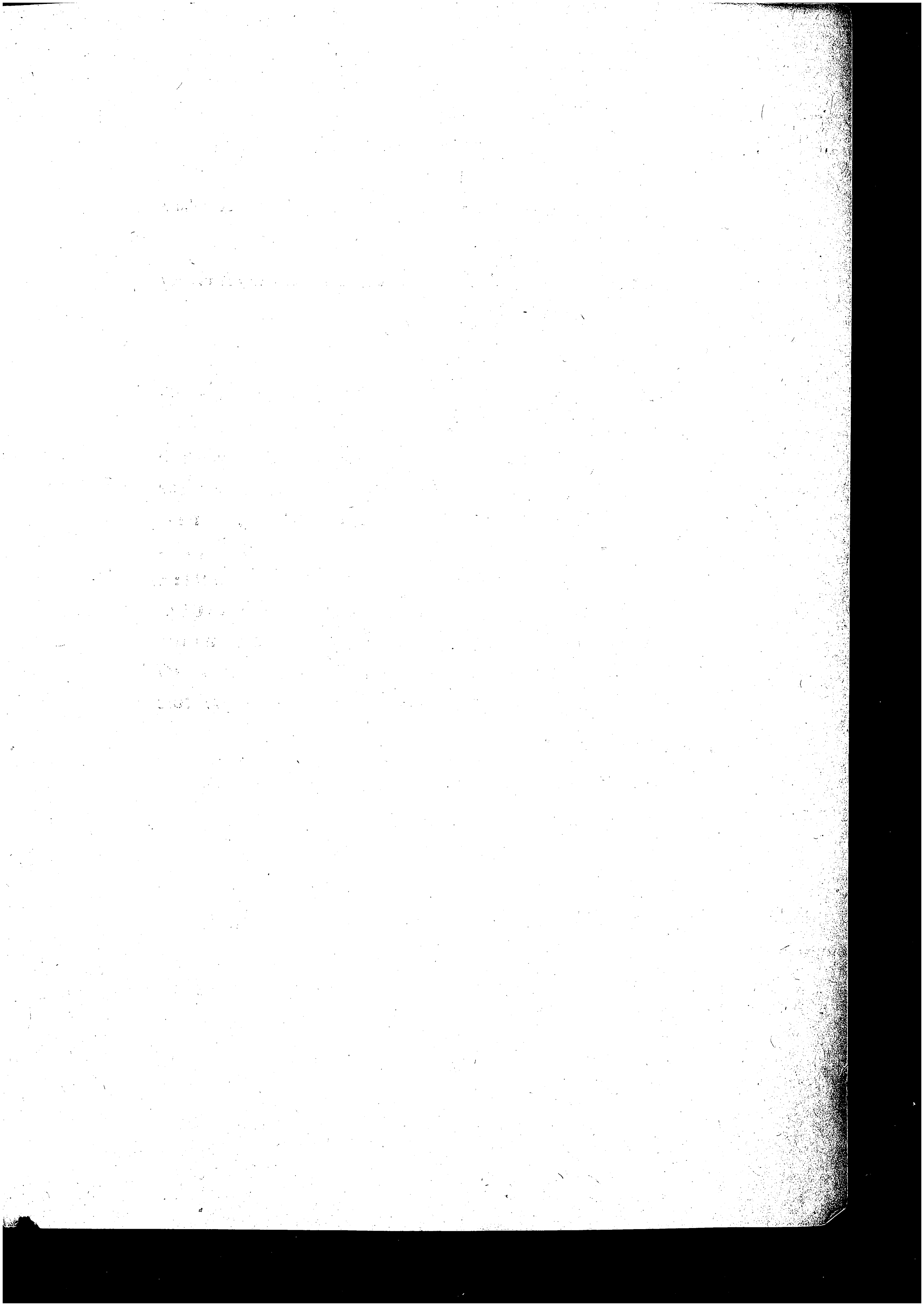
(a) the area of the iron core and the dimensions of the window.

(b) the number of turns of the primary and secondary windings.

(c) the fraction of full load at which maximum efficiency will be obtained.

Density of iron = 7·8 gm/cm^3,

9 — Find the main dimensions of the core and window of a 150 KVA 10000/380 volt, 50 cps, 3 phase, core type, delta / star, oil immersed transformer. The following design data cau be assumed : voltage per turn = 9.1, current density d = 2.3 amp/sq. mm. max flux density in core and yoke = 12500 gauss window space factor = 0.24, Height to window = 2.5: 1 transformer efficiency at full load, unity p.f. = 0.975 If the ratio of the weight of copper is 3 : 1 find the weight of iron and copper. Sp. iron loss at 12500 gauss 50 cps is 2.11 wt/Kg and sp. copper loss is 2.7 a^2.



المراجع

(References)

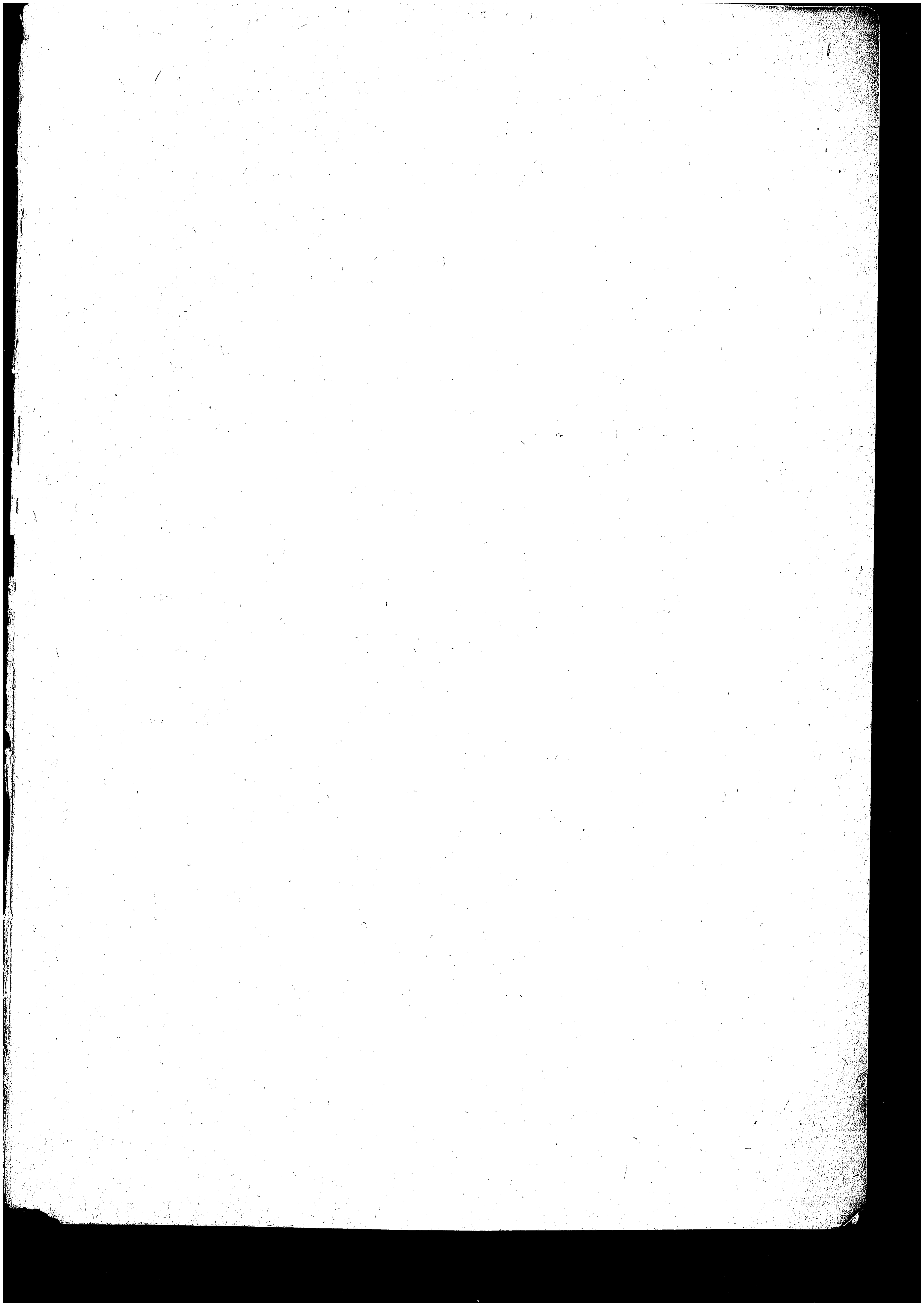
1 — *Langsdorf* ; Theory of alternating current machinery. Mc Graw - Hill book company, New York and London.

2 — *Say, M.G.* : The performance and desing of alternating *and Pink, E.N*; current machines, Sir Isaac Pitman and Sons, Ltd., London.

3 — *Boedefeld* ; Elektrische Machinen, Springer Verlag, *und Sequenz* ; Wien.

4 — *Richter* . Elektrische Maschinen, Verlag Birkhauser Basel.

٥ — هندسة الآلات الكهربية ، تأليف الدكتور محمد احمد قمر ، الناشر منشأة المعارف بالاسكندرية (جلال حزى وشركاه)



محتويات الكتاب

الباب الثالث

صفحة

الباب الخامس

الباب السادس

صفحة

الباب السابع

الباب الثامن

صفحة

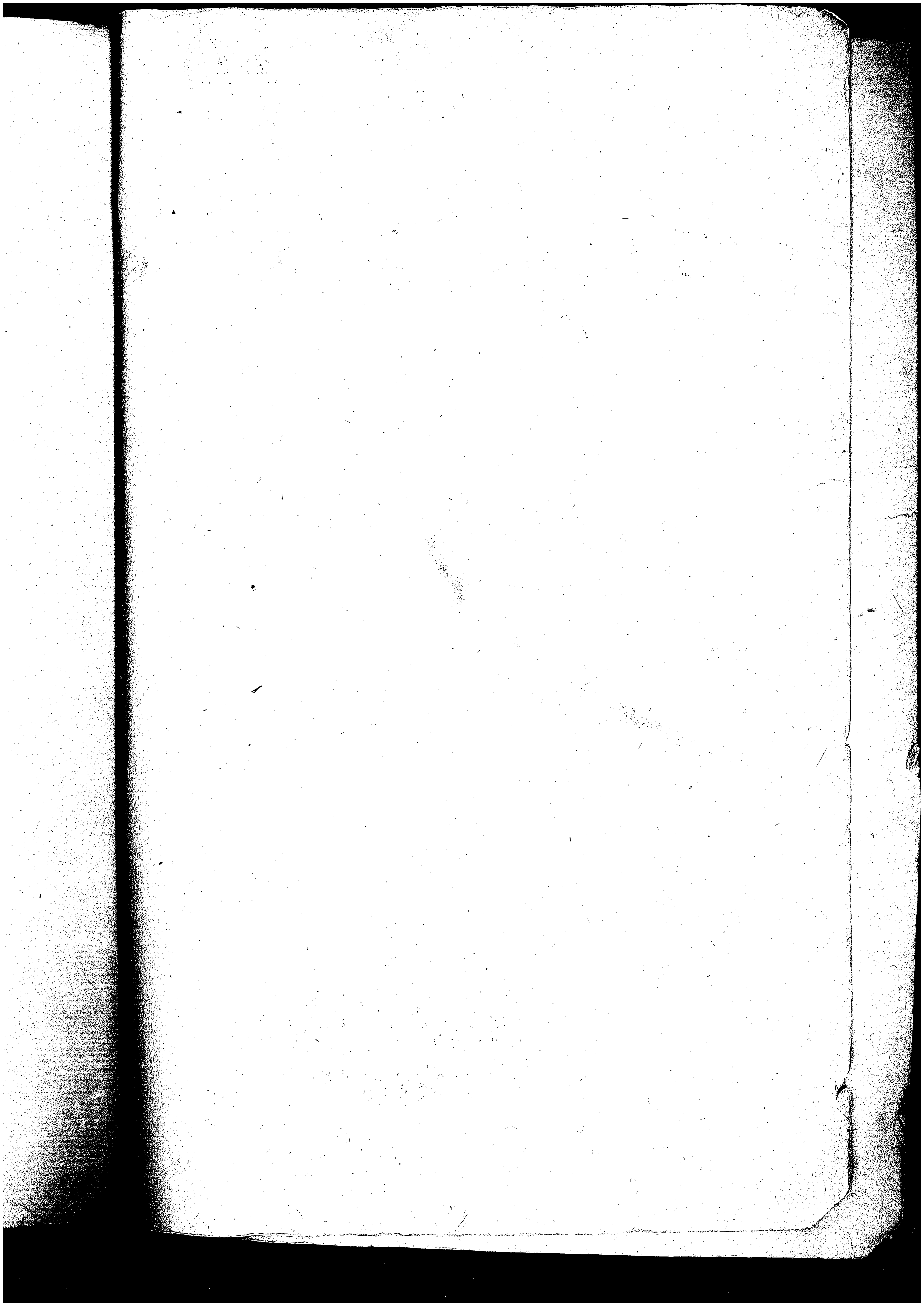
صفحة

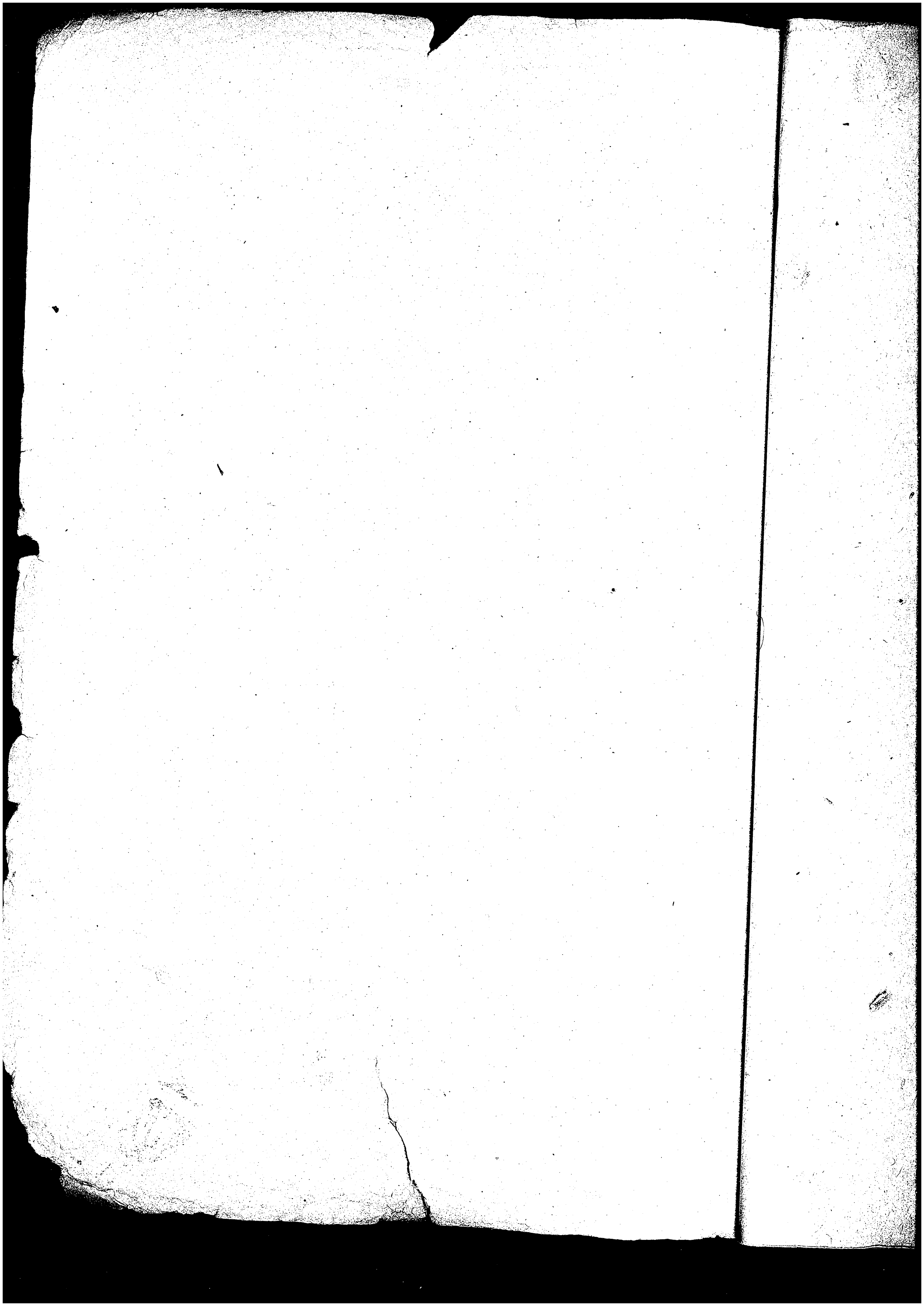
الباب التاسع

الباب العاشر

صفحة

رقم الايداع بدار الكتب
تم بحمد الله ، طبع هـذا الكتاب فى
شركة الاسكندرية للطبـاعة والنشر
١ شارع فنتورا بجوار سيدى عبدالرزاق
تليفون : ٣٥٨٤١





مجموعة الكتب الهندسية

١ ــ مقاومة واختبار المواد . أول
٢ ــ مقاومة واختبار المواد . ثانى
٣ ــ الجيولوجيا الهندسية
٤ ــ تصميم الآلات . انجليزى
٥ ــ الاختبارات غير المتلفة وتحليل الاجهادات بالطرق التجريبية
٦ ــ مبادىء المساحة المستوية والطبوغرافية
٧ ــ أسس الهندسة الكهربية . أول
٨ ــ أسس الهندسة الكهربية . ثانى
٩ ــ الرفاصات البحرية . انجليزى
١٠ ــ محركات الاحتراق
١١ ــ هندسة القوى الكهربية . انجليزى
١٢ ــ هندسة الآلات الكهربية
١٣ ــ نظريات وتصميم الآلات الكهربية : الآلات المتزامنة والمحولات الكهربية
١٤ ــ هندسة القوى الكهربية . عربى جزء أول

مجموعة الكتب الهندسية